



Pedro Gabriel Saraiva de Matos

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Temperaturas de Fabrico e
Compactação de Misturas Betuminosas
com Betumes Modificados: Interação
Agregado-Betume**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Micaelo

Júri:

Presidente:	Professor Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues
Arguente:	Eng.º Luís Manuel Trindade Quaresma
Vogal:	Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Micaelo



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2012

“Copyright” Pedro Gabriel Saraiva de Matos, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização deste trabalho de investigação só foi possível devido ao apoio e colaboração de várias pessoas e entidades, a quem gostaria de expressar os meus maiores e sinceros agradecimentos.

À EUROCALCIO e SECIL pelo fornecimento dos fileres utilizados no fabrico dos mastiques betuminosos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Micaelo, pela disponibilidade, pelo acompanhamento, apoio, confiança e transmissão de conhecimentos que permitiram a realização deste trabalho.

À Engenheira Cátia Duarte, por me ter recebido nas instalações da empresa Probigalp – Ligantes Betuminosos S.A., pela orientação, apoio e conhecimentos transmitidos durante a fase experimental deste trabalho.

Ao Sr. Augusto de Almeida, responsável do laboratório NIDIM, pelo apoio, transmissão de conhecimentos, fornecimento de documentação e disponibilidade.

Para os técnicos de laboratório Ulisses e Inês Marques, que contribuíram para a realização dos ensaios, um grande agradecimento pelo seu apoio, interesse, esclarecimento de dúvidas e boa disposição.

Um agradecimento especial para o técnico de laboratório Nuno Pires e para o diretor de produção Hélder Cardoso, por todo o apoio, motivação, boa disposição e pelos bons momentos passados.

Aos meus colegas e amigos pela amizade, motivação e companheirismo que têm transmitido ao longo de muitos anos.

A Maria, pelo amor, amizade e apoio, que tanto contribuiu para a realização e conclusão deste trabalho.

Finalmente, um especial agradecimento aos meus pais e irmão, a quem devo a pessoa que me tornei, que com o seu grande amor e vontade me têm ajudado e apoiado em todas as fases da minha vida, proporcionando a realização deste trabalho.

Resumo

Os agregados finos têm um papel importante nas misturas betuminosas, preenchendo os vazios existentes entre os agregados, e em conjunto com o ligante betuminoso formam o mástico betuminoso, responsável por ligar e aglutinar a matriz de agregados mais grossos. O mástico participa ativamente no comportamento das misturas betuminosas, sendo muitas vezes considerado o verdadeiro ligante e influenciando os processos de fabrico e compactação.

Atualmente, as metodologias de determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas definem intervalos de viscosidade ótima, que diferem para os betumes puros e modificados devido ao seu comportamento reológico.

O presente trabalho visa avaliar o efeito do agregado mais fino, o fíler, nas temperaturas de fabrico e compactação de betumes puros e modificados com SBS, determinadas recorrendo a diferentes metodologias propostas em outros trabalhos, e a interação agregado-betume. A quantidade de fíler a aplicar nos mastiques betuminosos foi definida de acordo com dois métodos, um que estabelece uma relação f/b em termos de massa e outro uma relação volumétrica em função do índice de vazios de Rigden.

Numa primeira fase, estudou-se o comportamento reológico dos betumes e mastiques betuminosos. Seguidamente, determinaram-se as temperaturas de fabrico e compactação dos betumes recorrendo ao método Superpave, para os betumes puros, e a duas metodologias propostas em outros trabalhos para os betumes modificados, e avaliou-se o efeito da adição do fíler nas temperaturas das misturas betuminosas.

Os resultados mostraram que o comportamento dos mastiques é influenciado pelo tipo de fíler e pela relação f/b aplicada. Em relação às temperaturas de fabrico e compactação, conclui-se que adição do polímero SBS provoca um aumento máximo da temperatura de 40°C, enquanto a adição do fíler contribui em média com um aumento de 10°C. A consideração do índice de vazios de Rigden na formulação dos mastiques, não altera as diferenças de comportamento entre mastiques com diferentes tipos de fíleres.

Palavras-chave:

Mastique betuminoso

Fíler

Betume modificado

Temperatura

Viscosidade

Abstract

Fine aggregate, particularly filler, plays an important role in bituminous mixtures behavior, other than merely filling voids within coarse aggregate skeleton. In general, bituminous mastic, the material composed of fine aggregate and bitumen, is usually considered the real binder in bituminous mixtures and highly affects the properties of bituminous mixtures.

Nowadays, mixture and compaction temperatures of neat and modified bitumen are determined using different methodologies for the two bitumen types.

The main objective of this scientific study is to evaluate the filler effect in mixing and compaction temperatures of neat and SBS modified bitumens, using different methodologies proposed in literature, and the interaction between materials.

First, a rheological study is conducted, based on dynamic viscosity measurements, at different temperature and shear rate conditions, of bitumens and mastics. Then, the mixture and compaction temperatures of bituminous binders are calculated. Finally, it was determined the temperature variation in mixing and compaction when different fillers are used in mastics.

The results have shown that the mastic behavior is affected by the filler content and type. The analysis of the determined temperatures allowed concluding that the SBS has a higher effect than filler in construction temperatures, with a maximum of 40°C. The filler increases temperatures in average 10°C. The use of Rigden voids in the formulation of the bituminous mastic did not show a reduction of behavior differences between different mastics.

Key-words:

Bituminous mastic

Filler

Modified bitumen

Temperature

Viscosity

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Organização.....	4
2.	Reologia	5
2.1.	Conceitos gerais	5
2.2.	Reologia dos betumes	10
2.3.	Modelos reológicos	12
3.	Mastique betuminoso	15
3.1.	Introdução	15
3.2.	Comportamento do mastique betuminoso	15
3.3.	Metodologias de determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas	25
3.3.1.	Método Superpave	26
3.3.2.	Viscosidade a uma taxa de corte elevada	28
3.3.3.	Viscosidade a uma taxa de corte zero	29
3.3.4.	Resumo.....	31
4.	Programa Experimental.....	33
4.1.	Introdução	33
4.2.	Betumes Base e Modificados	33
4.2.1.	Processo de modificação dos betumes	33
4.3.	Ensaio de caracterização de betumes.....	35
4.3.1.	Penetração – EN 1426:2007.....	35
4.3.2.	Temperatura de amolecimento – Método do anel e bola – EN 1427:2007	35
4.3.3.	Viscosidade dinâmica usando o viscosímetro rotativo – EN 13302:2010.....	36
4.3.4.	Dispersão do polímero em betumes modificados – EN 13632:2010.....	38
4.4.	Resultados dos ensaios de caracterização dos betumes.....	38
4.4.1.	Betumes Puros.....	38
4.4.2.	Betumes modificados	40
4.5.	Fíleres	46
4.5.1.	Análise da sedimentação dos Fíleres	47
4.6.	Mastiques betuminosos	48
4.6.1.	Metodologias de formulação dos mastiques betuminosos	49

4.6.2.	Processo de fabrico dos mastiques betuminosos	49
4.7.	Análise dos resultados de caracterização dos mastiques betuminosos	50
4.7.1.	Método A	51
4.7.2.	Método B	56
5.	Temperaturas de fabrico e compactação	71
5.1.	Introdução	71
5.2.	Betumes puros e modificados	71
5.2.1.	Discussão dos resultados	74
5.3.	Mastiques betuminosos	75
5.3.1.	Método A – Caderno de encargos da E.P. (2009)	76
5.3.2.	Método B – caderno de encargos da JAE (1998)	79
5.3.3.	Comparação dos resultados	82
6.	Conclusão e desenvolvimentos futuros	91
6.1.	Conclusão	91
6.2.	Desenvolvimentos futuros	93
	Referências bibliográficas	95
	Anexo A – Caracterização do comportamento reológico dos betumes Puros	99
	Anexo B – Caracterização do comportamento reológico dos betumes modificados	101
	Anexo C – Caracterização do comportamento reológico dos mastiques betuminosos	105
	Anexo D – Temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques	135
	Anexo E – Fichas técnicas dos fileres	139
	Anexo F – Temperaturas de fabrico e compactação recomendadas pelos produtores	145

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada [2].....	1
Figura 1.2 – Diagrama de produção de betumes puros [1].	2
Figura 2.1 – Representação esquemática do modelo de Newton para a Lei da Viscosidade [8].	5
Figura 2.2 – Comportamento reológico dos materiais Newtonianos.	6
Figura 2.3 – Comportamento reológico dos materiais <i>shear-thinning</i> ou Pseudoplásticos.....	7
Figura 2.4 – Comportamento reológico dos materiais <i>shear-thickening</i> ou Dilatante.....	7
Figura 2.5 – Comportamento reológico dos materiais do tipo plástico de Bingham.	8
Figura 2.6 – Comportamento reológico dos materiais com comportamento viscoso independente do tempo [modificado de 10].	8
Figura 2.7 – Comportamento reológico dos materiais com comportamento viscoso dependente do tempo. Comportamento Tixotrópico.	9
Figura 2.8 – Comportamento reológico dos materiais com comportamento viscoso dependente do tempo. Comportamento anti-Tixotrópico.	9
Figura 2.9 - Viscosidade dinâmica vs. Taxa de corte para um betume puro e um betume modificado.	10
Figura 2. 10 - Variação da Viscosidade com a Temperatura de um betume puro e um betume modificado. Diagrama BTDC [13].	11
Figura 2.11 – Intervalos abrangidos pelos vários modelos [11].	13
Figura 3.1 - Diagrama esquemático ilustrando a ocupação dos vazios do fíler pelo betume [21].	18
Figura 3.2 - Distribuição dos vazios de Rigden para vários tipos de fíleres [22].....	18
Figura 3.3 - Comparação das especificações francesas para o índice de vazios Rigden e para o poder absorvente com os resultados dos ensaios [21].	19
Figura 3.4 - Intervalos de temperaturas para os vários tipos de misturas betuminosas [23]	25
Figura 3.5 – Diagrama BTDC: viscosidades de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes puros [34].	27
Figura 3.6 – Relação linear entre a viscosidade dinâmica e a temperatura [4].....	28
Figura 4.1 – Banho a 25°C (esquerda), Penetrómetro (centro) e Agulhas de penetração (direita).	35
Figura 4.2 – Equipamento de medição da temperatura de amolecimento (esquerda) e Suporte, anéis e esferas (direita).	36
Figura 4.3 – Viscosímetro rotativo de Brookfield, <i>Thermosel</i> , regulador de temperatura (esquerda); Câmara de amostra (centro); Haste/ <i>Spindles</i> e veios (esquerda).....	37
Figura 4.4 – Dispersão do polímero SBS no betume B35/50 PMB2.....	41
Figura 4.5 – Dispersão do polímero SBS no betume B35/50 PMB4.....	42
Figura 4.6 – Dispersão do polímero SBS no betume B 50/70 PMB2.....	43
Figura 4.7 – Dispersão do polímero SBS no betume B 50/70 PMB4.....	44

Figura 4.8 – Fíler RC480 (esquerda); Fíler RC590 (centro); Cal-NHL5 (direita)	46
Figura 4.9 – Viscosidade vs. Tempo (Mastique com betume B 35/50 + Cal-NHL5).....	47
Figura 4.10 - Manta de aquecimento, misturador e termômetro de controlo da temperatura.....	50
Figura 4.11 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método A).	52
Figura 4.12 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método A).	52
Figura 4.13 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método A).	53
Figura 4.14 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método A).....	53
Figura 4.15 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método A).....	54
Figura 4.16 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método A).....	54
Figura 4.17 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método A).....	55
Figura 4.18 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método A).....	55
Figura 4.19 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método A).....	56
Figura 4.20 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método B).	57
Figura 4.21 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método B).	57
Figura 4.22 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método B).	58
Figura 4.23 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método B).....	58
Figura 4.24 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método B).....	59
Figura 4.25 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método B).....	59
Figura 4.26 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método B).....	60
Figura 4.27 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método B).....	60

Figura 4.28 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método B).....	61
Figura 4.29 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para T= 120°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).....	64
Figura 4.30 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para T= 165°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).....	64
Figura 4.31 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para T= 120°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).....	65
Figura 4.32 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para T= 165°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).....	65
Figura 4.33 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para T= 120°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).....	66
Figura 4.34 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para T= 165°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).....	67
Figura 4. 35 - Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para T= 120°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).....	67
Figura 4.36 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para T= 165°C e $\gamma=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).....	68
Figura 5.1 – Determinação da temperatura de fabrico e compactação do betume B 35/50.....	71
Figura 5.2 – Fluxograma para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques betuminosos.	75
Figura 5.3 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método Superpave (Método A).	77
Figura 5.4 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método HSRV-E (Método A).....	78
Figura 5.5 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método ZSRV-S (Método A).	79
Figura 5.6 - Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método Superpave (Método B).....	80
Figura 5.7 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método HSRV-E (Método B).....	81
Figura 5.8 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método ZSRV-S (Método B).....	82
Figura 5.9 – Contribuição do polímero e dos fíleres no aumento das temperaturas de fabrico e compactação em relação aos betumes puros e mastique de referência (método Superpave).....	86

Figura 5.10 - Contribuição do polímero e dos fíleres no aumento das temperaturas de fabrico e compactação em relação aos betumes puros e mastique de referência (método HSRV-E).....	87
Figura 5.11 - Contribuição do polímero e dos fíleres no aumento das temperaturas de fabrico e compactação em relação aos betumes puros e mastique de referência (método ZSRV-S).....	88
Figura A.1 – Viscosidade dinâmica do betume B 35/50, para várias temperaturas e taxas de corte.....	99
Figura A.2 – Viscosidade dinâmica do betume B 50/70, para várias temperaturas e taxas de corte.....	99
Figura B.1 – Viscosidade dinâmica do betume B 35/50 PMB2, para várias temperaturas e taxas de corte.....	101
Figura B.2 – Viscosidade dinâmica do betume B 35/50 PMB4, para várias temperaturas e taxas de corte.....	101
Figura B.3 – Viscosidade dinâmica do betume B 50/70 PMB2, para várias temperaturas e taxas de corte.....	102
Figura B.4 – Viscosidade dinâmica do betume B 50/70 PMB4, para várias temperaturas e taxas de corte.....	102
Figura C.1 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 100°C para várias taxas de corte (Método A).	114
Figura C.2 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método A).	115
Figura C.3 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método A).	115
Figura C.4 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 100°C para várias taxas de corte (Método A).....	116
Figura C.5 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método A).....	116
Figura C.6 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método A).....	117
Figura C.7 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método A).....	117
Figura C.8 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método A).....	118
Figura C.9 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 100°C para várias taxas de corte (Método B).....	118
Figura C.10 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método B).	119

Figura C.11 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método B).....	119
Figura C.12 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método B).....	120
Figura C.13 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método B).....	120
Figura C. 14 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método B).....	121
Figura C.15 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método B).....	121
Figura E.1 - Características do fíler RC480.....	139
Figura E.2 - Distribuição granulométrica do fíler RC480.	140
Figura E.3 - Características do fíler RC590.....	141
Figura E.4 - Distribuição granulométrica do fíler RC590.	142
Figura E.5 - Ficha técnica da Cal Hidráulica	143
Figura F.1 - Temperaturas de fabrico e compactação de betumes puros e modificados, recomendadas pelo produtor Galp.	145

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Requisitos para as propriedades do filer comercial (EN 13043) [15].	20
Quadro 3.2 - Especificações para o filer em misturas betuminosas de vários países.	21
Quadro 3.3 - Especificações para as propriedades dos fileres utilizadas em Portugal [17,23,30].	22
Quadro 3.4 - Propriedades e métodos de ensaio [22].	24
Quadro 3.5 – Limites propostos para a trabalhabilidade [22].	24
Quadro 3.6 – Limites máximos propostos para o Jnr do mastique, em termos da dimensão dos agregados [22].	24
Quadro 3.7 – Metodologias de determinação das temperaturas e fabrico e compactação.	31
Quadro 4.1 – Percentagens dos reagentes usados na preparação dos betumes modificados.	34
Quadro 4.2 - Intervalos de funcionamento para cada haste [9].	37
Quadro 4.3 – Resultados da caracterização dos betumes puro.	39
Quadro 4.4 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o betume B 35/50.	39
Quadro 4. 5 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o betume B 50/70.	39
Quadro 4.6 – Exigências de conformidade para os betumes puros.	40
Quadro 4.7 - Resultados da caracterização do betume modificado B 35/50 PMB2.	41
Quadro 4.8 - Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 35/50 PMB2.	41
Quadro 4.9 – Resultados da caracterização do betume modificado B 35/50 PMB4	42
Quadro 4.10 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 35/50 PMB4.	42
Quadro 4.11 – Resultados da caracterização do betume modificado B 50/70 PMB2	43
Quadro 4.12 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 50/70 PMB2.	43
Quadro 4.13 - Resultados da caracterização do betume modificado B 50/70 PMB4	44
Quadro 4.14 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 50/70 PMB4.	44
Quadro 4.15 – Requisitos para as características dos betumes modificados	45
Quadro 4.16 – Características principais dos fileres.	46
Quadro 4.17 – Tempos previstos para a sedimentação dos filer no betume B 35/50.	48
Quadro 4.18 – Tempos previstos para a sedimentação dos filer no betume B 50/70.	48
Quadro 4.19 – Exigências para a formulação de mastiques betuminosos.	49
Quadro 4.20 – Resumo das relações f/b usadas na produção dos mastiques betuminosos.	49

Quadro 4.21 – Resultados da caracterização dos mastiques betuminosos da classe 35/50 (Método A).	51
Quadro 4.22 – Resultados da caracterização do mastiques betuminosos da classe 50/70 (Método A).	51
Quadro 4.23 – Resultados da caracterização do mastiques betuminosos da classe 35/50 (Método B).	56
Quadro 4.24 – Resultados da caracterização do mastiques betuminosos da classe 50/70 (Método B).	56
Quadro 4.25 – Valores máximos e mínimos das temperaturas de amolecimento registados nos mastiques.	61
Quadro 4.26 – Mastiques que respeitam os requisitos impostos pelo método A.	62
Quadro 5.1 – Temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados, de acordo com o método Superpave.	72
Quadro 5.2 – Variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros.	72
Quadro 5.3 – Temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados, de acordo com o método HSRV-E.	72
Quadro 5.4 – Variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros (HSRV-E).	73
Quadro 5.5 – Temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados, de acordo com o método ZSRV-S.	73
Quadro 5.6 - Variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros (ZSRV-S).	73
Quadro 5.7 – Temperaturas de fabrico e compactação recomendadas pelo produtor.	74
Quadro 5.8 – Verificação da trabalhabilidade dos mastiques da classe 35/50.	83
Quadro 5.9 – Verificação da trabalhabilidade dos mastiques da classe 50/70.	84
Quadro 5.10 - Relações Fíler-Betume utilizadas.	84
Quadro 5.11 - Concentração crítica e concentração volumétrica de fíler.	85
Quadro B.1 – Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os betumes modificados da classe 35/50.	103
Quadro B.2 – Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os betumes modificados da classe 50/70.	103
Quadro B.3 - Equações do modelo da Lei de Potência para os betumes modificados.	104
Quadro C.1 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC480 (método A).	105
Quadro C.2 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC590 (método A).	105
Quadro C.3 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + Cal-NHL5 (método A).	105

Quadro C.4 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC480 (método A).....	106
Quadro C.5 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC590 (método A).....	106
Quadro C.6 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5 (método A).	106
Quadro C.7 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4 + RC480 (método A).....	106
Quadro C.8 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4 + RC590 (método A).....	107
Quadro C.9 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5 (método A).	107
Quadro C.10 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC480 (método A).	107
Quadro C.11 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC590 (método A).	107
Quadro C.12 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + Cal-NHL5 (método A).....	108
Quadro C.13 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC480 (método A).....	108
Quadro C.14 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC590 (método A).....	108
Quadro C.15 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + Cal-NHL5 (método A).	108
Quadro C.16 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC480 (método A).....	109
Quadro C.17 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC590 (método A).....	109
Quadro C.18 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + Cal-NHL5 (método A).	109
Quadro C.19 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC480 (método B).	109
Quadro C.20 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC590 (método B).	110
Quadro C.21 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + Cal-NHL5 (método B).	110

Quadro C.22 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC480 (método B).....	110
Quadro C.23 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC590 (método B).....	110
Quadro C.24 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5 (método B).....	111
Quadro C.25 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4+ RC480 (método B).....	111
Quadro C.26 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4+ RC590 (método B).....	111
Quadro C.27 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4+ Cal-NHL5 (método B).	111
Quadro C.28 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC480 (método B).	112
Quadro C.29 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC590 (método B).	112
Quadro C.30 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + Cal-NHL5 (método B).	112
Quadro C.31 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC480 (método B).....	112
Quadro C.32 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC590 (método B).....	113
Quadro C.33 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + Cal-NHL5 (método B).....	113
Quadro C.34 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC480 (método B).....	113
Quadro C.35 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC590 (método B).....	113
Quadro C.36 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + Cal-NHL5 (método B).....	114
Quadro C.37 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 (Método A).	122
Quadro C.38 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 PMB2	122
Quadro C.39 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50PMB4	123

Quadro C.40 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 (Método A).	123
Quadro C.41 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB2.....	124
Quadro C.42 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB4	124
Quadro C.43 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50	125
Quadro C. 44 - Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 PMB2	125
Quadro C.45 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 PMB4	126
Quadro C.46 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 (Método B).	126
Quadro C.47 - Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB2	127
Quadro C.48 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB4	127
Quadro C.49 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 (método A).....	128
Quadro C.50 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB2 (método A).	128
Quadro C.51 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB4 (método A).	129
Quadro C.52 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 (método B).	129
Quadro C.53 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB2 (método B).....	130
Quadro C.54 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB4 (método B).....	130
Quadro C.55 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 (método A).....	131
Quadro C.56 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB2 (método A)	131
Quadro C.57 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB4 (método A)	132
Quadro C.58 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 (método B)	132

Quadro C.59 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB2 (método B).....	133
Quadro C.60 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB4 (método B).....	133
Quadro D.1 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 6,8 s-1 (Método A).....	135
Quadro D.2 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 6,8 s-1 (Método B).	135
Quadro D.3 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 500 s-1 (Método A).....	135
Quadro D.4 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 500 s-1 (Método B)	136
Quadro D.5 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 50/70, para uma taxa de corte de 6,8 s-1 (Método A).....	136
Quadro D.6 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 50/70, para uma taxa de corte de 6,8 s-1 (Método B)	136
Quadro D.7 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 50/70, para uma taxa de corte de 500 s-1 (Método A).....	137
Quadro D.8 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 500 s-1 (Método B).	137

Lista de Símbolos e Abreviaturas

Símbolos

Letras romanas

Símbolo	Significado
A	Área
b	Betume
C	Concentração volumétrica do sistema filer/betume
C _s	Concentração crítica de filer
d	Distância
D _b	Densidade do betume
D _f	Densidade do filer
f	Filer
F	Força
g	Aceleração gravítica
G	Módulo de Corte
J _{nr}	Flexibilidade por fluência não recuperada
K	Constante modelo de cross
m	Constante modelo de cross
n	Índice da lei de potência
t	Tempo
T	Temperatura
T _{ab}	Temperatura de amolecimento (método anel e bola)
v	Velocidade
V	Volume
V _f	Volume de filer
V _b	Volume de betume

Letras gregas

Símbolo	Significado
$\dot{\gamma}$	Taxa de corte
$\dot{\gamma}_v$	Taxa de corte da componente viscosa

ΔT_{ab}	Variação da temperatura de amolecimento (método anel e bola)
η	Viscosidade dinâmica
η_0	Valor assintótico da viscosidade dinâmica à taxa de corte zero
η_∞	Valor assintótico da viscosidade dinâmica à taxa de corte infinita
η_p	Viscosidade de um material com comportamento plástico de Bingham
v	Índice de vazios de Rigden ou vazios do filer seco compactado
ρ	Densidade de um material
ρ_s	Densidade das partículas
ρ_f	Densidade do fluido
τ	Tensão de corte
ν	Viscosidade cinemática

Siglas e Abreviaturas

Sigla	Significado
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
BTDC	<i>Bitumen Test Data Chart</i>
E.P.	Estradas de Portugal S.A.
HSRV-E	<i>High Shear Rate Viscosity - Evolution</i>
IPen	Índice de penetração
J.A.E.	Junta Autónoma de Estradas
NHL5	<i>Natural Hydraulic Lime 5</i> (Cal hidráulica Natural)
N92	Número de rotações do compactador giratório necessárias para a obtenção de um grau de compactação de 92% (relativo à baridade máxima teórica)
PEN25	Penetração a 25°C com agulha
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SBS	<i>Styrene Butadiene Styrene</i>
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
VMA	<i>Voids in Mineral Aggregates</i> (Vazios na mistura de agregado)
ZSRV-S	<i>Zero Shear Rate Viscosity – Simplification</i>

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A rede rodoviária é a principal infraestrutura responsável pelo desenvolvimento social e económico de qualquer país, permitindo a mobilidade de bens e pessoas, melhorando a qualidade de vida. Nesta, a qualidade dos pavimentos rodoviários é extremamente importante, pelo que a comunidade científica e técnica tem procurado um aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento e otimização do comportamento dos materiais. Os pavimentos rodoviários têm como principal função proporcionar comodidade, segurança e economia à circulação de veículos por intermédio de uma superfície de rolamento, sob as ações oriundas do tráfego e dos agentes climáticos. Estes são formados por várias camadas diferentes, constituídas por diferentes materiais, apoiadas numa fundação, formada pelo terreno natural. De acordo com os materiais constituintes de cada camada, os pavimentos são distinguidos em três tipos: flexíveis, rígidos e semirrígidos. Os pavimentos flexíveis são os mais utilizados em Portugal. Estes são constituídos por camadas superiores formadas por misturas betuminosas, sendo as camadas inferiores constituídas por material granular [1,2].

As misturas betuminosas são formadas por um conjunto de agregados, doseados de uma forma ponderal ou volumétrica, ligante betuminoso e ar, conforme ilustrado na Figura 1.1.

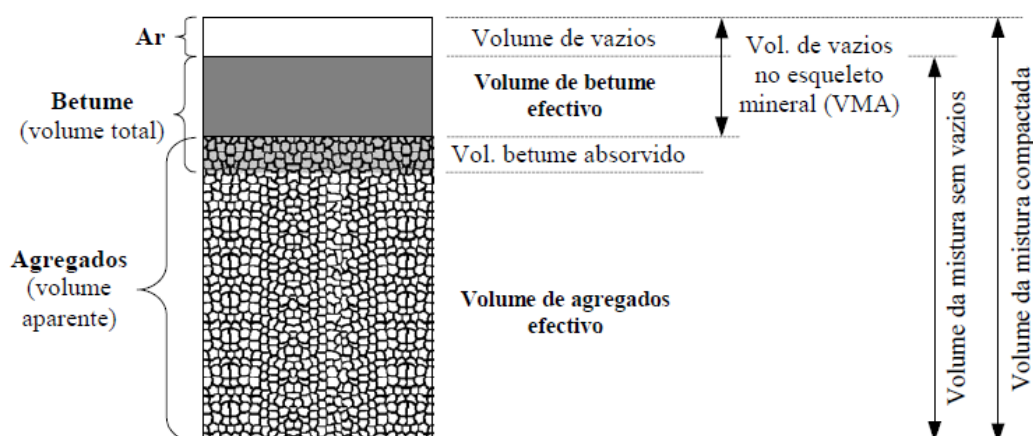


Figura 1.1 – Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada [2].

O ligante betuminoso mais utilizado é o betume, obtido através da destilação do petróleo bruto, Figura 1.2. A sua principal função é envolver as partículas de agregados assegurando as propriedades fundamentais das misturas betuminosas como a estabilidade, flexibilidade, durabilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade, trabalhabilidade e compactabilidade [1].

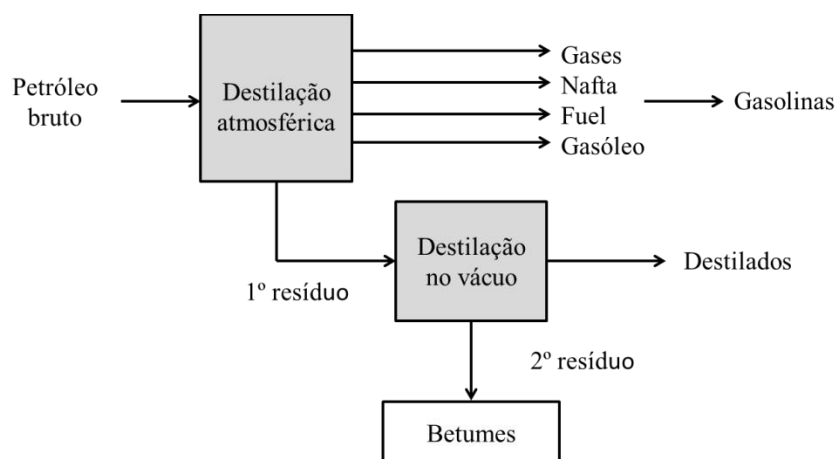


Figura 1.2 – Diagrama de produção de betumes puros [1].

As propriedades reológicas dos betumes têm grande influência no desempenho das misturas betuminosas durante o processo de mistura, compactação e em serviço. O betume caracteriza-se por ter um comportamento viscoelástico, traduzindo-se numa dependência da temperatura e do tempo de carregamento. Com a variação da temperatura o comportamento dos betumes pode variar de perfeitamente plástico (temperaturas muito baixas) a perfeitamente viscoso (temperaturas elevadas). A viscosidade é a propriedade dos betumes que, influenciada pela temperatura, melhor define o seu comportamento reológico, sendo por isso importante na determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas.

Os betumes modificados surgem em Portugal nos anos 90 do século XX. Dependendo do tipo de aditivo, caracterizam-se por conferirem às misturas betuminosas maior flexibilidade, traduzindo-se numa resposta mais eficaz a maiores solicitações do pavimento, auferindo aos pavimentos maior capacidade de suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações, menor suscetibilidade térmica, resistência às deformações permanentes, ao envelhecimento durante a utilização e à fadiga, solucionando alguns problemas funcionais, contribuindo para a diminuição do ruído de rolamento, aumento da aderência, da regularidade e melhoria das características de drenabilidade superficial [1,3,4].

A modificação dos betumes puros pode ser realizada através da adição de polímeros, borrachas, fibras orgânicas e inorgânicas entre outros. Os betumes modificados por adição de polímeros, elastómeros e plastómeros, são os mais utilizados. A adição de plastómeros ao betume melhora as propriedades dos betumes a altas temperaturas de serviço e com a adição de elastómeros as propriedades dos betumes melhoram a baixas e a altas temperaturas. O polímero normalmente mais utilizado na modificação de betumes é o SBS (estireno-butadieno-estireno) [1,5].

Entende-se por mastique betuminoso a combinação entre o ligante betuminoso e os agregados finos. Dentro dos agregados finos, o fíler é o que mais se destaca devido às suas propriedades distintas. O fíler tem grande importância na formulação das misturas betuminosas, visto que, completa a granulometria dos agregados mais grossos, preenchendo os vazios existentes entre estes e altera as

propriedades dos ligantes betuminosos, agindo como parte ativa do masticue. A quantidade de fíler presente no masticue betuminoso influencia a lubrificação das partículas dos agregados mais grossos, as características de compactação da mistura e o teor ótimo em betume. As características físicas e químicas do fíler são determinantes no tipo de ligação entre o fíler e o betume, influenciando as propriedades do masticue. Segundo Airey e Westwood, mencionado em [3], o masticue apresenta comportamento reológico não-Newtoniano, influenciando a determinação das temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas. A quantidade fíler presente no masticue provoca um aumento da viscosidade e por consequência um aumento da temperatura.

A determinação das temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas é essencial para obter um pavimento com as características previstas em projeto. As temperaturas ideais no processo de fabrico proporcionam um envolvimento eficiente do betume aos agregados, enquanto no processo de compactação, as temperaturas deverão permitir que as partículas dos agregados se desloquem numa estrutura compacta, resistente, durável e coesa. Os custos de aquecimento dos materiais têm um peso importante e deve ser tido em conta [4,6,7].

Atualmente, as temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes puros são determinadas, laboratorialmente, recorrendo ao método Superpave. Este método apresenta limitações de aplicabilidade aos betumes modificados, determinando temperaturas demasiado elevadas que provocam envelhecimento excessivo, separação do aditivo do betume, libertação de fumos tóxicos, etc [3]. Para os betumes modificados as temperaturas são determinadas de acordo com metodologias apresentadas em diversos trabalhos científicos. Santos [4] estudou a reologia de betumes modificados com SBS provenientes de diferentes refinarias da Península Ibérica a temperaturas elevadas, seguido da determinação das temperaturas de fabrico e compactação de betumes puros e modificados através da aplicação de várias metodologias propostas, que têm como base a medição da viscosidade dos betumes a várias temperaturas. Os resultados obtidos permitiram concluir que o método Superpave, para os betumes puros, determina temperaturas de fabrico e compactação aceitáveis, estando de acordo com os limites propostos pelos produtores e normas europeias. Para os betumes modificados este método não é aconselhado visto que determina temperaturas superiores a 180°C. Para estes, o método da viscosidade a uma taxa de corte elevada (evolução) e o método da viscosidade a uma taxa de corte baixa (simplificação) são os métodos que determinam temperaturas aceitáveis.

1.2. Objetivos

O presente trabalho de investigação surge no seguimento do estudo realizado por Santos [4], intitulado de “Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados” e tem como principal objetivo, avaliar o efeito da adição de agregados finos,

especialmente o fíler, nas temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes puros e modificados.

Numa primeira fase são analisados laboratorialmente mastiques constituídos por diferentes fileres e betumes puros e modificados com polímero SBS. São produzidas misturas com duas percentagens de polímero e para cada tipo de fíler, os mastiques são formulados com duas relações f/b diferentes. A análise incide num estudo do comportamento reológico dos mastiques betuminosos, medindo viscosidades a diferentes temperaturas e taxas de corte.

A segunda fase do trabalho corresponde ao estudo das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros, aplicando o método Superpave e, dos betumes modificados, recorrendo a dois métodos: o da viscosidade a uma taxa de corte zero (simplificação) e a da viscosidade a uma taxa de corte elevada (evolução).

Por último, realiza-se um estudo sobre os mastiques betuminosos com o intuito de avaliar o efeito da adição de fíler aos betumes nas temperaturas fabrico e compactação de misturas betuminosas e a interação agregado-betume.

1.3. Organização

A presente dissertação está organizada em seis capítulos.

No primeiro capítulo é realizado um enquadramento do tema, apresentando os objetivos do trabalho e indicando-se a respetiva organização do trabalho.

O segundo capítulo é dedicado aos conceitos fundamentais da reologia, necessários para a compreensão das características reológicas dos betumes e mastiques estudados.

No terceiro capítulo apresentam-se algumas considerações sobre os mastiques betuminosos e as metodologias usadas para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas dos betumes puros e modificados e dos mastiques.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados de caracterização dos betumes puros e modificados e dos mastiques betuminosos. Inclui uma descrição do processo de modificação dos betumes puros e do processo de fabrico dos mastiques.

No capítulo cinco expõem-se os resultados das temperaturas de fabrico e compactação obtidas para os betumes puro e modificados e os resultados das diferenças de temperatura verificadas em cada mastique, obtidas através dos vários métodos.

Por fim, no sexto capítulo, inclui-se as conclusões sobre os resultados e são sugeridas algumas ideias para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. Reologia

2.1. Conceitos gerais

O termo “reologia” foi introduzido pelo Professor Eugene Bingham em 1929, sendo definida como a ciência que estuda a deformação (sólidos elásticos) e escoamento (fluídos) dos materiais [8]. A viscosidade, a elasticidade e a plasticidade são as propriedades dos materiais com maior importância nos estudos reológicos.

A reologia abrange o estudo do comportamento mecânico dos materiais desde o seu estado sólido até ao seu estado líquido sendo a lei de Hooke e a lei de Newton utilizadas para descrever o comportamento idealizado dos sólidos e líquidos, respetivamente.

A lei de Hooke, desenvolvida em 1678 pelo cientista inglês Robert Hooke, engloba a teoria da elasticidade, estando portanto relacionada com a mecânica dos sólidos. Esta lei tem como princípio a *“força atuante é diretamente proporcional à deformação”*, definindo assim a base da teoria da elasticidade clássica [8].

A designada lei de Newton foi inicialmente apresentada por Isaac Newton em 1687 com a seguinte definição: *“a resistência resultante do atrito interno entre as partes do líquido, em condições iguais, é proporcional à velocidade com que as partes do líquido são separadas entre si”*. A este atrito interno chama-se viscosidade [8].

A viscosidade é uma característica fundamental para todos os líquidos. Quando um líquido flui, existe uma resistência interna ao fluxo/corte. Quanto maior for esta resistência, maior será a força necessária para causar o movimento do líquido, ou seja, maior será a força de corte.

Considerando um líquido contido entre duas placas paralelas entre si com área A , separadas à distância d , em que a placa inferior é fixa e a placa superior move-se com uma velocidade v , devido à aplicação de uma força F , conforme ilustrado na Figura 2.1.

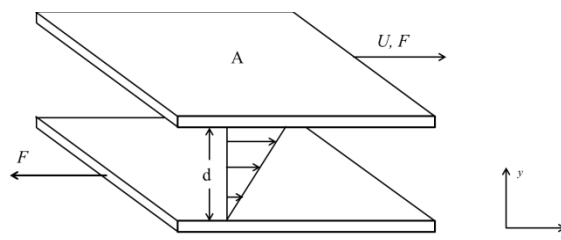


Figura 2.1 – Representação esquemática do modelo de Newton para a Lei da Viscosidade [8].

A força F vai gerar uma tensão de corte, $\tau = \frac{F}{A}$, habitualmente expresso em Pa , que é proporcional ao gradiente de velocidade $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx}$, normalmente denominado de taxa de corte, em s^{-1} , ou seja, $\tau = \eta \dot{\gamma}$, sendo a constante de proporcionalidade η a viscosidade do fluído, habitualmente

expresso em $Pa.s$ [8]. Esta relação entre a tensão de corte e a taxa de corte é definida através de uma relação linear para os fluídos newtonianos [7].

Outra forma de representar a viscosidade é através da viscosidade cinemática, em mm/s^2 , que relaciona a viscosidade dinâmica com a massa volúmica do material, ρ , Equação (2.1).

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.1)$$

As principais variáveis que afetam habitualmente a viscosidade dos materiais são a temperatura, a pressão, tempo de carregamento e a taxa de corte, que por sua vez irão definir o comportamento dos materiais [8].

Relativamente à dependência da taxa de corte, o comportamento reológico dos materiais é classificado em dois tipos:

- Newtoniano;
- Não-Newtoniano.

Um material Newtoniano é aquele em que, a uma dada temperatura, a viscosidade é constante com a variação da taxa de corte apresentando ao mesmo tempo uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte, Figura 2.2 [8,9].

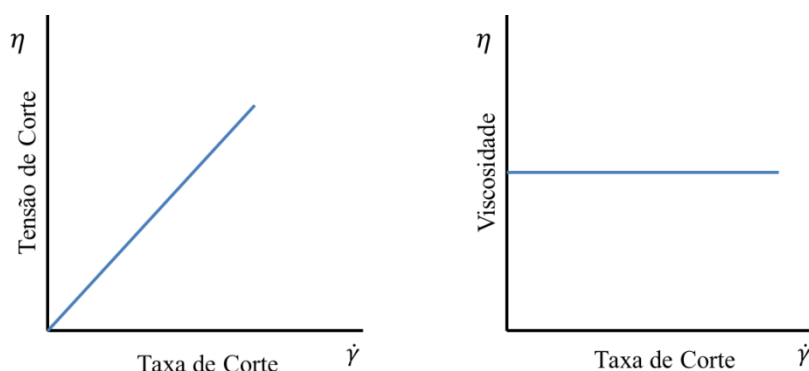


Figura 2.2 – Comportamento reológico dos materiais Newtonianos.

Em relação aos materiais Não-Newtonianos, estes caracterizam-se por uma relação não linear entre a tensão de corte e a taxa de corte, ou seja, ao variar a taxa de corte não se observa uma variação proporcional da tensão de corte, resultando igualmente numa alteração dos valores da viscosidade [9]. Devido à grande variedade das características reológicas exibidas pelos materiais não-Newtonianos, estes podem ser classificados em:

- Não-Newtonianos viscosos;
- Não-Newtonianos viscoelásticos.

O grupo dos materiais não-Newtonianos viscosos é subdividido em dois grupos, os não-newtonianos independentes do tempo e os não-newtonianos dependentes do tempo. O primeiro subgrupo engloba os materiais cujas propriedades reológicas são independentes do tempo de aplicação

da tensão de corte, sendo que a viscosidade apenas depende da taxa de corte. Este grupo pode, por sua vez, ser subdividido em materiais sem e com tensão de cedência [8].

No grupo dos materiais sem tensão de cedência distinguem-se dois tipos de comportamentos, o pseudoplástico, também designado de *shear-thinning*, e o dilatante ou *shear-thickening*. Ambos os comportamentos caracterizam-se por uma variação da viscosidade com o aumento da taxa de corte, sendo que, o comportamento pseudoplástico traduz-se numa diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte, Figura 2.3, e o comportamento dilatante descreve o comportamento oposto, ou seja, um aumento da viscosidade com o aumento da taxa de corte, Figura 2.4 [8,10].

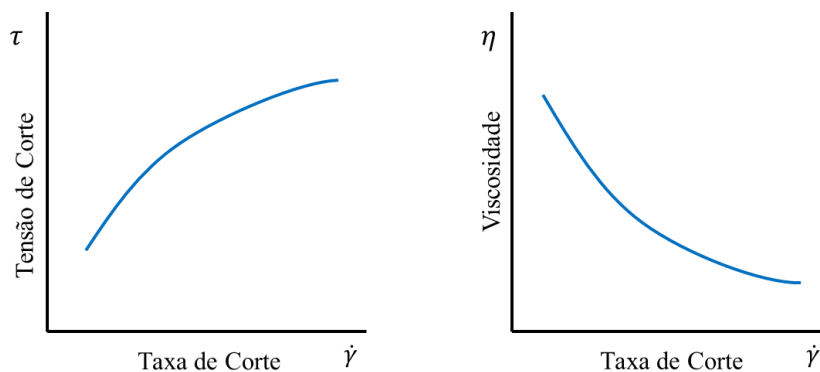


Figura 2.3 – Comportamento reológico dos materiais *shear-thinning* ou Pseudoplásticos.

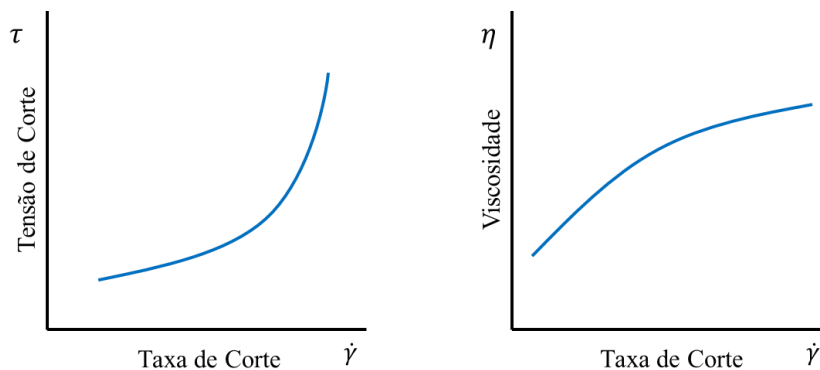


Figura 2.4 – Comportamento reológico dos materiais *shear-thickening* ou Dilatante.

Nos materiais com tensão de cedência, insere-se o comportamento plástico. Estes materiais comportam-se como sólidos elásticos em condições estáticas e, após a aplicação de uma tensão de corte mínima, o material começa a fluir. Após atingir a tensão de cedência, o material adota um comportamento newtoniano, pseudoplástico ou dilatante. Define-se como comportamento plástico de Bingham quando o material, ao atingir a tensão de cedência, apresenta uma relação linear entre a tensão de corte e a taxa de corte, Figura 2.5 [8,11].

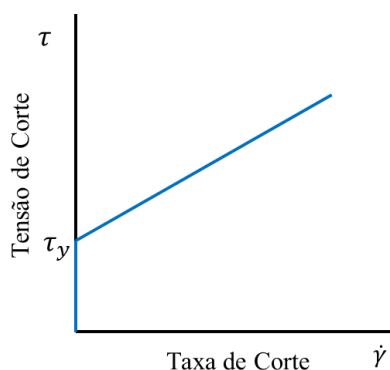


Figura 2.5 – Comportamento reológico dos materiais do tipo plástico de Bingham.

O gráfico da Figura 2.6, representa o comportamento reológico típico dos materiais newtonianos e não newtonianos independentes do tempo.

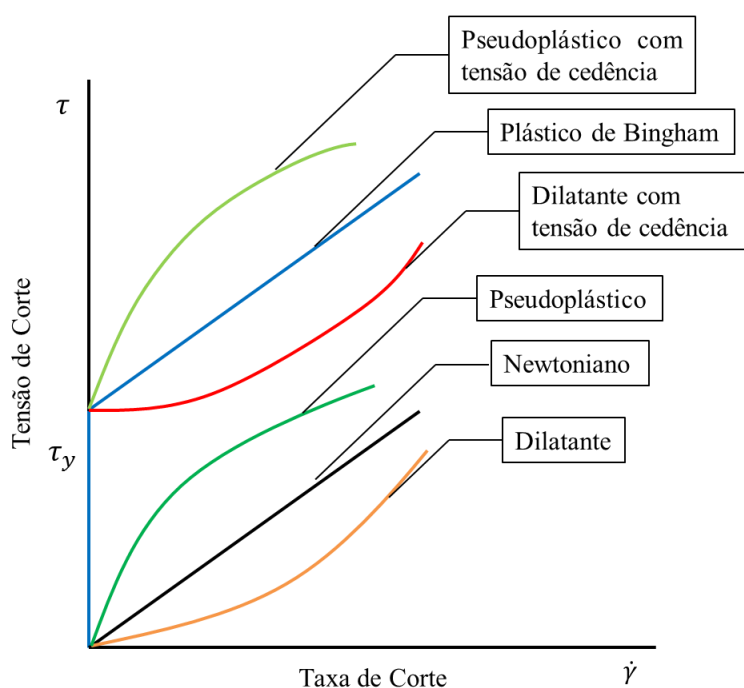


Figura 2.6 – Comportamento reológico dos materiais com comportamento viscoso independente do tempo [modificado de 10].

No que respeita aos materiais não-newtonianos dependentes do tempo, estes caracterizam-se por uma mudança na viscosidade em função do tempo sob condições constantes da taxa de corte.

Distinguem-se dois tipos de comportamento:

- Tixotrópico;
- Anti-Tixotrópico.

O comportamento Tixotrópico caracteriza-se por uma diminuição gradual da viscosidade ao longo do tempo de carregamento, sob uma tensão de corte ou taxa de corte constante, Figura 2.7. Este fenómeno não é permanente, atingindo-se ao fim de algum tempo um valor constante.

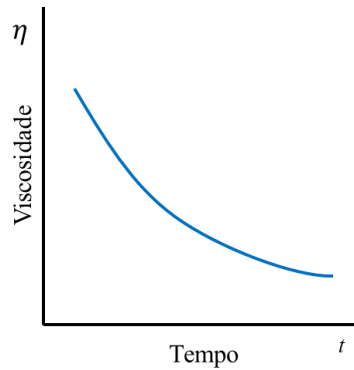


Figura 2.7 – Comportamento reológico dos materiais com comportamento viscoso dependente do tempo.
Comportamento Tixotrópico.

Em relação ao comportamento anti-Tixotrópico, trata-se de um fenómeno oposto ao anteriormente descrito, ou seja, a viscosidade aumenta ao longo do tempo sob as mesmas condições, Figura 2.8. Este comportamento ocorre quando um material tem um comportamento *shear-thickening*, sendo o oposto da Tixotropia, que se verifica na circunstância em que um material tem comportamento *shear-thinning*.

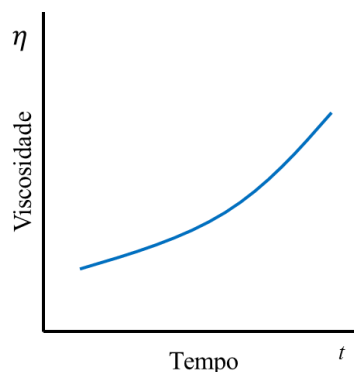


Figura 2.8 – Comportamento reológico dos materiais com comportamento viscoso dependente do tempo.
Comportamento anti-Tixotrópico.

No que respeita ao comportamento de materiais Não-Newtonianos viscoelásticos, diz-se que um material tem comportamento viscoelástico quando exhibe, em simultâneo, características elásticas e viscosas, ou seja, apresentam propriedades mistas entre os fluidos e os sólidos.

Numa análise experimental a um material viscoelástico, verifica-se uma dependência da escala do tempo em relação ao tempo natural do material, isto é, se o tempo da experiência for lento, a amostra irá apresentar um aspeto viscoso, ao invés, se a experiência for mais rápida, um comportamento elástico irá ser observado. Verifica-se um comportamento viscoelástico para escalas de tempo intermédias, apresentando uma recuperação parcial da deformação quando se retira a tensão aplicada [8,10].

A viscoelasticidade pode ser dividida em dois grupos distintos, viscoelasticidade linear e viscoelasticidade não linear.

A viscoelasticidade linear caracteriza-se por uma relação linear entre o estímulo e a resposta em qualquer instante. Sendo assim, os materiais que se enquadram neste grupo podem, por sua vez, ser classificados como os materiais Não-Newtonianos independentes do tempo. No que diz respeito ao comportamento viscoelástico não-linear, este pode ser equiparado com o comportamento Não-Newtoniano dependente do tempo, embora seja complicado distinguir na prática a variabilidade da tensão com origem na elasticidade e na Tixotropia/anti-Tixotropia [10].

2.2. Reologia dos betumes

Um dos principais fatores que mais afeta o desempenho das misturas betuminosas durante o processo de fabrico e compactação são as propriedades reológica dos betumes. O betume possui um comportamento viscoelástico, com dependência da temperatura e da carga aplicada. Dependendo destes dois fatores, o comportamento dos betumes poderá variar de perfeitamente elástico, para baixas temperaturas e solicitações rápidas, a perfeitamente viscoso, para altas temperaturas e solicitações quasi-estáticas. Assim, para temperaturas elevadas utiliza-se a viscosidade para caraterizar reologicamente o betume, nomeadamente nos métodos de determinação das temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas [1,4,5].

Os betumes puros caracterizam-se por exibirem um comportamento Newtoniano a temperaturas elevadas, ou seja, a viscosidade mantém-se constante com a alteração da taxa de corte [7]. Em relação aos betumes modificados, estes caracterizam-se por apresentarem um comportamento não-Newtoniano, do tipo *shear-thinning*, ou seja, existe uma redução da viscosidade com o aumento da taxa de corte. Na Figura 2.9 compara-se o comportamento Newtoniano de um betume com um modificado. Os mastiques betuminosos, constituídos por agregados finos e betume, apresentam também um comportamento não-Newtoniano [12].

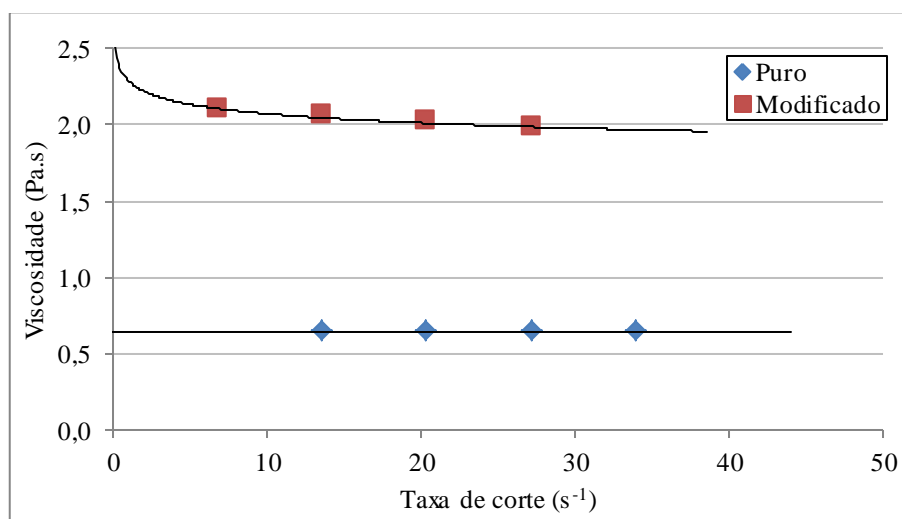


Figura 2.9 - Viscosidade dinâmica vs. Taxa de corte para um betume puro e um betume modificado.

A viscosidade dos betumes puros apenas é afetada pela temperatura enquanto os betumes modificados são afetados pela temperatura e pela taxa de corte. Ambos os tipos de betume têm em comum a diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura, apesar de esta diminuição ser diferente entre eles. Na Figura 2.10 compara-se o comportamento de um betume puro com um betume modificado, através do diagrama BTDC – *Bitumen Test Data Chart*, desenvolvido por Heukelom. Neste diagrama estão representadas as curvas correspondentes a um betume puro (*50 pen bitumen*) e a um betume modificado com SBS (*CARIPHALTE DM*), embora o diagrama BTDC não seja adequado para os betumes modificados. Com esta representação verifica-se que o betume modificado com SBS em relação ao betume puro apresenta um aumento da rigidez a temperaturas elevadas, uma redução da rigidez a temperaturas baixas tal como um melhoramento da flexibilidade a baixas temperaturas e da resistência térmica e à fadiga. [7, 13].

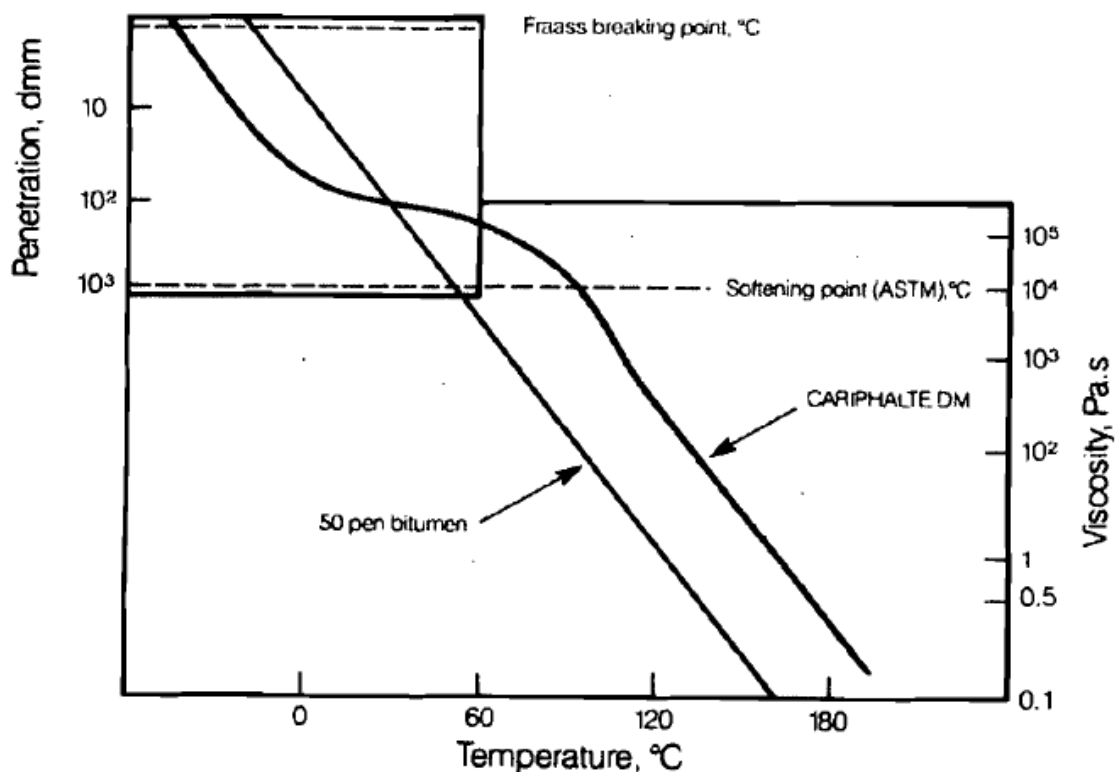


Figura 2. 10 - Variação da Viscosidade com a Temperatura de um betume puro e um betume modificado. Diagrama BTDC [13].

2.3. Modelos reológicos

De modo a expressar a variação da viscosidade com a taxa de corte ou a tensão, vários modelos matemáticos têm sido propostos para o comportamento reológico dos fluídos.

Conforme foi referido na secção 2.1, a viscosidade pode ser constante ou variável, dependendo se o comportamento é Newtoniano ou não-Newtoniano. Seguidamente serão apresentados alguns modelos que melhor representam os comportamentos encontrados durante a realização desta dissertação, mais propriamente, os comportamentos reológicos Newtonianos, não-Newtonianos viscosos independentes do tempo e viscoelástico linear.

Os fluídos Newtonianos possuem uma equação constitutiva simples, a lei de Newton da viscosidade, sendo a viscosidade de corte a única constante, η , Equação (2.2) [4].

$$\tau = \eta \times \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Os modelos reológicos aplicados aos fluidos não-newtonianos têm uma viscosidade de corte dependente da taxa de corte. Assim sendo, a equação constitutiva que melhor representa este comportamento toma a forma da Equação (2.3).

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \times \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Em relação aos fluidos não-Newtonianos viscosos independentes do tempo, o modelo reológico que melhor define o seu comportamento é o modelo de Cross, Equação (2.4), visto abranger qualquer intervalo de taxa de corte.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (K \times \dot{\gamma})^m} \quad (2.4)$$

em que, η_0 e η_{∞} são valores assintóticos da viscosidade a uma taxa de corte muito baixa e muito alta, respetivamente, K é um parâmetro constante com as dimensões de tempo e m é uma constante adimensional. Quando o valor m tende para zero, a equação descreve o comportamento reológico newtoniano, ao passo que para os fluídos com um comportamento *shear-thinning*, a constante m tende para a unidade [8,11].

O modelo da lei de potência, ou modelo de Ostwald-de Waele, surge de uma simplificação do modelo de Cross, para situações em que $\eta_0 \gg \eta_{\infty}$, $K\dot{\gamma} \gg 1$ e η_{∞} é muito pequeno, Equação (2.5). Com uma simples alteração das variáveis, obtém-se a Equação (2.6), em que k é designado de índice consistência e n é o índice da lei de potência [8]. O índice de consistência determina o nível de viscosidade a uma determinada taxa de deformação, enquanto que o índice de lei de potência regula o tipo de comportamento reológico. Quando $n = 1$, o modelo descreve o comportamento reológico Newtoniano, para $n < 1$ verifica-se o comportamento reológico *shear-thinning* e para $n > 1$ o comportamento designado de *shear-thickening* [10].

$$\eta = \frac{\eta_0}{(K \times \dot{\gamma})^m} \quad (2.5)$$

$$\eta = k \times \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2.6)$$

O modelo da lei de potência falha para taxas de corte elevadas, onde a viscosidade deve aproximar-se de um valor contante. Esta falha pode ser completada através do uso do modelo de Sisko [8].

Em certos materiais, verifica-se que a viscosidade se afasta do domínio da lei de potência, aproximando-se de η_0 . Para contornar esta situação, basta simplesmente adicionar-se uma contribuição Newtoniana à lei de potência. Para taxas de corte elevadas, $\eta_0 \gg \eta_\infty$ e $K\dot{\gamma} \gg 1$, obtendo-se assim, através da simplificação do modelo de Cross, o modelo de Sisko, Equação (2.7) [8,11].

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0}{(K \times \dot{\gamma})^m} \quad (2.7)$$

Do modelo de Sisko, para $m = 1$ e multiplicando a Equação (2.7) pela taxa de corte, obtém-se a Equação (2.8), que descreve o comportamento reológico independente do tempo com tensão de cedência, do tipo plástico de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \times \dot{\gamma} \quad (2.8)$$

Os parâmetros de Bingham são a tensão de corte, $\tau_0 = \eta_0/K$, e a viscosidade plástica η_p , corresponde a η_∞ [4,11].

Na Figura 2.10, apresentam-se os intervalos de taxa de corte cobertos pelos modelos atrás referidos, evidenciando-se as limitações do modelo lei de potência e do modelo de Sisko, 1 a 10^3 s^{-1} e 10^{-1} s^{-1} a 10^3 s^{-1} , respetivamente [11].

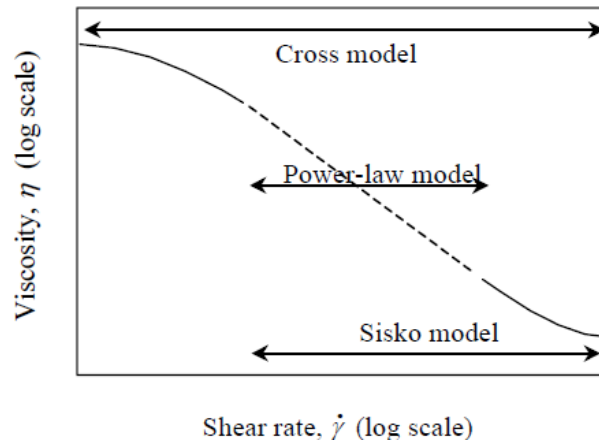


Figura 2.11 – Intervalos abrangidos pelos vários modelos [11].

3. Mastique betuminoso

3.1. Introdução

Entende-se por mastique betuminoso a combinação do ligante betuminoso com agregados finos. Este constitui a matriz da mistura betuminosa com comportamento visco-elásto-plástico, com a função de envolver e manter ligados os agregados mais grossos, considerados elementos elásticos embebidos no mastique, preencher os vazios existentes no esqueleto mineral, por forma a garantir compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas betuminosas. O mastique é geralmente admitido o ligante real das misturas betuminosas [6,14].

Os ligantes betuminosos, nomeadamente o betume, desempenham um papel fundamental nas misturas betuminosas, sendo o elo de ligação entre os agregados e proporcionando às misturas coesão e estabilidade, tornando as ligações com os materiais mais flexíveis e firmes [5].

Segundo a EN 13043 [15] define-se por agregados finos todos os agregados com dimensão inferior a 2mm, sendo o fíler o agregado mais fino e que mais influencia as características dos mastiques.

No subcapítulo 3.2 apresentam-se algumas considerações sobre os mastiques betuminosos, o seu comportamento e as formulações usadas na dosagem dos seus constituintes.

No subcapítulo 3.3 apresentam-se as metodologias utilizadas na determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes puros e modificados.

3.2. Comportamento do mastique betuminoso

A aplicação do fíler nas misturas betuminosas tem sido alvo de vários estudos desde o início de 1900, que cedo comprovou que a adição de fíleres provoca um aumento da rigidez dos mastiques betuminosos [16]. Designa-se por fíler, todo o agregado cuja maior parte passa pelo peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades [17]. Estas propriedades são claramente verificadas no fabrico de misturas betuminosas, melhorando o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, desde que os limites para granulometria e plasticidade sejam obedecidos. [14]

No fabrico de misturas betuminosas distinguem-se os dois tipos de fíleres seguintes: o fíler comercial, produzido em instalações industriais segundo um processo controlado e o fíler recuperado, resultante do processo de secagem dos agregados da mistura betuminosa por recuperação dos finos através de filtros de ar. É imprescindível que as partículas de fíler sejam não hidrófilas, de modo a obter uma adequada mistura do fíler com o betume. Para que este objetivo se concretize, as partículas de fíler deverão ser finas e não plásticas. [5,18]

Por ser um material muito fino, o fíler desempenha um papel muito importante quando adicionado às misturas betuminosas, tendo como principal finalidade o preenchimento dos vazios existentes entre os agregados, contribuindo para a formação do esqueleto mineral, e o aumento da viscosidade do ligante (estabilização da matriz). As propriedades de ligação entre o fíler e o betume têm uma influência bastante significativa na melhoria do comportamento do mástico e, por conseguinte, em importantes propriedades das misturas betuminosas, tais como, o comportamento mecânico, o teor ótimo em betume, a durabilidade e a trabalhabilidade.

Segundo Santana, citado em [14], a influência do fíler pode ser interpretada de duas formas:

- Mástico com fíler total: segundo Ruiz, num mástico bem dosado as partículas de fíler encontram-se em suspensão no betume, originando um mástico homogêneo;
- Mástico com fíler ativo: segundo Puzinauskas, uma parte do fíler adota um comportamento de um agregado fino, formando um esqueleto mineral e a outra parte mantém-se em suspensão formando um mástico.

Outros autores, consideram que as partículas de maior dimensão do fíler são parte do agregado mineral da mistura preenchendo os vazios entre os agregados grossos, conferindo maior resistência às misturas. As partículas mais finas do fíler misturam-se com o betume aumentando a sua consistência e aglutinando as partículas de maior dimensão, formando o mástico [14].

Segundo Craus *et al.*, mencionado em [2], o desempenho mecânico e estrutural das misturas betuminosas está diretamente relacionado com a irregularidade geométrica do fíler, influenciando o teor ótimo em betume das misturas betuminosas, as propriedades de interação entre o fíler e o betume e o comportamento reológico dos mastiques. Esta irregularidade geométrica é relevante nas propriedades dos mastiques, que por sua vez podem ser analisadas através das suas características, sendo as mais relevantes a intensidade de adsorção, a atividade superficial e a superfície específica. A intensidade de adsorção é a característica mais importante dos aspetos físico-químicos da interação fíler-betume. Por exemplo, existe uma adsorção muito intensa entre a cal hidráulica e betume, equivalendo a uma adsorção química, enquanto entre um fíler silicioso e o betume, verifica-se uma adsorção mecânica de moléculas não polares através de forças de Van der Waals. Este fator pode ser definido como a variação na concentração dos componentes do fíler e do betume na interface entre o fíler e o betume e em regiões próximas. Esta variação tem origem nos diferentes tipos de forças de atracção mútua que podem ser de natureza mecânica, cinética, electroestática térmica ou química, definindo, por sua vez, o tipo de adsorção:

- Adsorção mecânica;
- Adsorção cinética;
- Adsorção térmica;
- Adsorção química.

A composição do betume e as propriedades do filer, principalmente, a composição mineralógica, a textura superficial e a superfície específica, são os principais fatores que afetam o mecanismo de adsorção dos mastiques.

Santana, mencionado em [19], afirma que o filer, para além de preencher os vazios, contribui para o aumento da viscosidade do ligante betuminoso. Este efeito provoca um aumento da temperatura de amolecimento, diminuição da penetração e da suscetibilidade térmica, aumento da resistência ao corte, aumento do módulo de rigidez e da resistência à tração na flexão.

O trabalho realizado por Kallas e Puzinauskas, citado em [16], consistiu num estudo detalhado do efeito da origem e características geométricas na viscosidade dos mastiques. Os autores observaram que os agregados mais finos originam viscosidades mais baixas em relação aos fileres, para os mesmos níveis de concentração em termos de volume. Englobou o estudo da dependência da viscosidade dos mastiques à variação das taxas de corte, para diferentes tipos fileres e diferentes concentrações. Os autores concluíram que a adição dos fileres provoca um aumento do comportamento não-Newtoniano, que é influenciado pelo tipo de filer e a quantidade aplicada. Em relação ao estudo da estabilidade de Marshall, observou-se uma boa correlação entre a viscosidade dos mastiques e a estabilidade de Marshall da mistura, concluindo-se que a estabilidade das misturas betuminosas varia conforme o tipo de filer.

Kavussi e Hicks observaram que o filer tem uma grande influência no comportamento dos mastiques e das misturas betuminosas, sendo que as suas propriedades físicas têm um efeito direto nas propriedades mecânicas do mastique que vão originar. Este estudo permitiu concluir que as dimensões das partículas dos fileres vão influenciar as propriedades dos mastiques, sendo a concentração de filer o fator com mais peso no comportamento [2,14].

Pinilla, referido em [19], determina a concentração crítica de filer, C_s , para a qual o mastique deixa de ser viscoso, adotando um comportamento não-Newtoniano ou plástico, Equação (3.1), onde V_f é o volume do filer e V_b o volume do ligante betuminoso. A concentração em volume de filer deverá ser igual ou inferior a C_s , de modo a obter misturas betuminosas com boa resistência à fadiga.

$$C_s = \frac{V_f}{(V_f + V_b)} \quad (3.1)$$

Através da concentração volumétrica do sistema filer-betume, C , é possível verificar a proximidade das partículas do filer, de forma que para valores maiores de C mais próximas se encontram as partículas de filer, aumentando a rigidez do mastique. A Concentração volumétrica é definida pela Equação (3.2), onde %b é a percentagem de betume, em peso, do total da amostra, %f é a percentagem de filer, em peso, do total da amostra, D_f e D_b correspondem às densidades do filer e do betume, respetivamente.

$$C = \frac{1}{\frac{\%b}{\%f} \times \frac{D_f}{D_b} + 1} \quad (3.2)$$

Segundo Santana, também referido em [19], os valores recomendados para a concentração volumétrica são de 10% a 20% inferiores à concentração crítica.

Em 1947, o estudo de Rigden, demonstrou a importância do filler no comportamento das misturas betuminosas, introduzindo um novo conceito de avaliação da porosidade, através da determinação do índice dos vazios do filler seco compactado, normalmente designado de índice de vazios de Rigden. Neste estudo, o autor considerou que, numa amostra compactada, uma certa quantidade de betume preenche os vazios existentes entre os fileres, designada de betume fixo, enquanto o restante é considerado de betume livre, Figura 3.1. Mais tarde, vários estudos concluíram que a granulometria dos fileres afeta a resistência dos mastiques, concluindo que as características geométricas dos fileres afetam o índice de vazios [20,21].

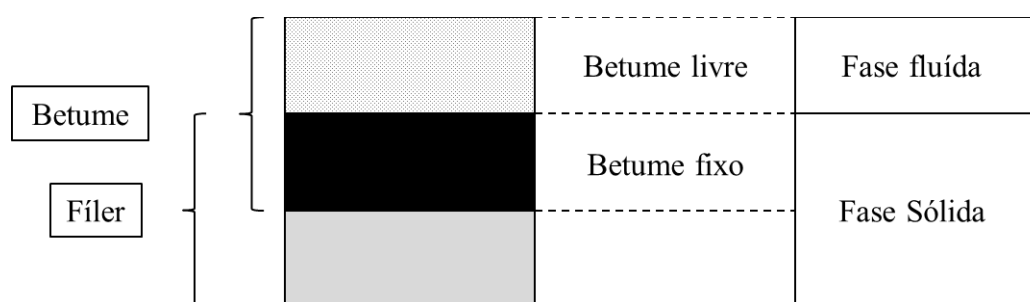


Figura 3.1 - Diagrama esquemático ilustrando a ocupação dos vazios do filler pelo betume [21].

Dos estudos realizados por Cooley Jr. *et al*, citado em [2], concluiu-se que o ensaio mais adequado para a caracterização do filler e que permite um melhoramento do comportamento dos mastiques betuminosos e das misturas betuminosas é o ensaio de determinação dos vazios de Rigden modificado. Na Figura 3.2 apresenta-se uma distribuição dos vazios de Rigden para vários tipos de fileres [22]. No que diz respeito aos mastiques, os autores constataram que os ensaios que melhor definem as suas características são a determinação da viscosidade cinemática e a determinação da temperatura de amolecimento. Seguidamente, a variação da viscosidade ou da temperatura de amolecimento do mástico era medida em relação ao betume que originou o mástico.

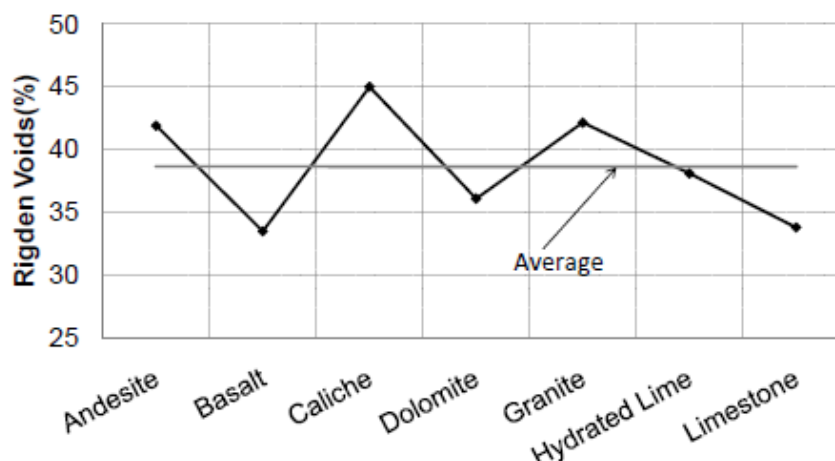


Figura 3.2 - Distribuição dos vazios de Rigden para vários tipos de fileres [22]

Os mesmos autores, tendo como base o desenvolvimento de novos ensaios de caracterização dos betumes durante o programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP), realizaram um estudo que consistiu na caracterização de diferentes mastiques recorrendo aos ensaios Superpave para caracterização de betumes. Os resultados obtidos permitiram concluir que o volume de vazios de Rigden modificado permite caracterizar o potencial de endurecimento do filer nos mastiques, através da medição da viscosidade, temperatura de amolecimento e do módulo de corte. Limitando a quantidade máxima de filer a 55% do volume total e através dos ensaios Superpave, os resultados demonstraram que o desempenho dos mastiques, para esta percentagem de filer, aumenta 3 vezes em relação ao betume que lhe deu origem para as temperaturas altas e intermédias e 3,7 vezes para temperaturas baixas [2].

No estudo realizado por Quaresma *et al.* [21], avaliou-se a relação entre o poder absorvente e o índice de vazios de Rigden de vários fileres (cimento, cal hidráulica, calcário e diferentes fileres de origem granítica). Com os resultados obtidos verificou-se que os fileres com menor índice de vazios de Rigden têm um poder absorvente mais elevado. Em França, as especificações para os filer definem que o índice de vazios de Rigden deverá ser inferior a 40% e o poder absorvente superior a 40g. As especificações belgas recomendam que o índice de vazios deverá ser entre 30% e 44%. Na Figura 3.3 apresenta-se uma comparação das exigências definidas pelas especificações francesas para o poder absorvente e para o índice de vazios de Rigden para os resultados obtidos. Verifica-se que a maioria dos fileres graníticos não está em conformidade com as exigências francesas, ao contrário das exigências belgas.

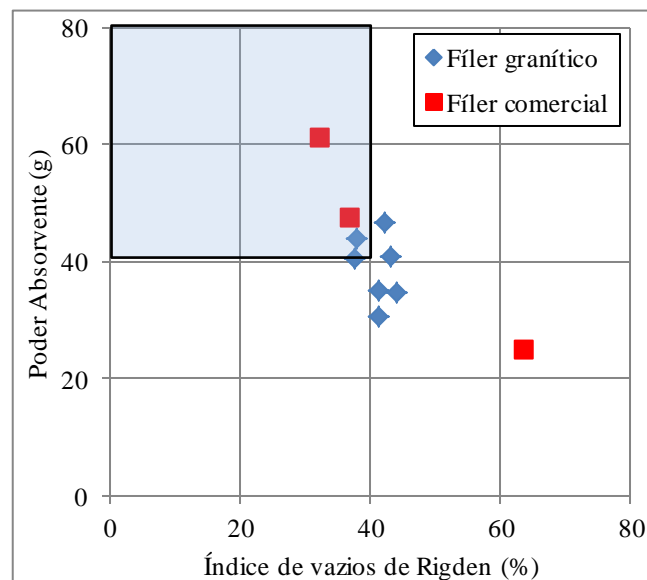


Figura 3.3 - Comparação das especificações francesas para o índice de vazios Rigden e para o poder absorvente com os resultados dos ensaios [21].

Atualmente, a maioria das especificações aplicadas na formulação de mastiques betuminosos, quer na Europa como nos E.U.A, apenas têm em consideração as características dos materiais e a

granulometria dos fileres, sendo a relação filer/betume limitada a intervalos pré-definidos. No Quadro 3.1 indicam-se alguns dos requisitos para as propriedades do filer comercial definido pela norma europeia EN 13043 [15]. No Quadro 3.2 apresentam-se as especificações definidas para o filer a aplicar nas misturas betuminosas para vários países. No Quadro 3.3 apresentam-se algumas especificações para as propriedades dos fileres utilizadas em Portugal.

Quadro 3.1 - Requisitos para as propriedades do filer comercial (EN 13043) [15].

Propriedades	Norma	Unidade	Requisitos
Granulometria	EN 933-10	mm	2 (100%); 0,125 (85-100%); 0,063 (70-100%)
Qualidade dos finos – valor de azul metileno (MB_F)	EN 933-9	g/kg	Categorias definidas de acordo com os valores máximos de MB_F : <ul style="list-style-type: none"> • MB_{F10} (=10) • MB_{F25} (=25) • $MB_{FDeclarado}$ (>25) • MB_{FNR} (Não requerido)
Massa volúmica	EN 1097-7	Mg/m ³	-Valor declarado pelo produtor. -Para o filer comercial a variação dos valores declarados deverão ser ≤ 2
Massa volúmica aparente em querosene	EN 1907-3	Mg/m ³	Variação declarada entre 0,5 e 0,9
Teor em água	EN 1097-5	%	≤ 1
Vazios de Rigden	EN 1097-4	%	Categorias definidas de acordo com os limites inferiores e superiores dos resultados individuais: <ul style="list-style-type: none"> • $v_{28/38}$ • $v_{38/45}$ • $v_{28/45}$ • $v_{45/55}$ • v_{NR} (Não requerido) -Variação máxima declarada deverá ser 4.
“Variação da temperatura anel e bola” do filer para misturas betuminosas	EN13179-1	°C	Categorias definidas de acordo com a variação da temperatura anel e bola: <ul style="list-style-type: none"> • $\Delta_{R\&B} 8/16$ • $\Delta_{R\&B} 17/25$ • $\Delta_{R\&B} 8/25$ • $\Delta_{R\&B} 25$ (>25) • $\Delta_{R\&B} NR$ (Não requerido)
Solubilidade em água	EN 1744-1	% (massa)	Categorias para valores máximos da solubilidade da água: <ul style="list-style-type: none"> • WS_{10} (=10) • $WS_{declarada}$ (>10) • WS_{NR} (Não requerido)
Teor de carbonato de cálcio de filer calcário	EN 196-21	% (massa)	<ul style="list-style-type: none"> • CC_{90} (=90) • CC_{80} (=80) • CC_{70} (=70) • CC_{NR} (Sem requisito)

Quadro 3.1 - Requisitos para as propriedades do filer comercial (EN 13043) [15]. (continuação)

Propriedades	Norma	Unidade	Requisitos
Teor de hidróxido de cálcio do filer aditivado	EN 459-2	% (massa)	<ul style="list-style-type: none"> • $Ka25$ (=25) • $Ka20$ (=20) • $Ka10$ (=10) • $KaDeclarada$ (<10) • $KaNR$ (Não requerido)
Ensaio de Blaine	EN196-6	m ² /kg	Variação dos valores declarados ≤ 140
Perda a fogo das cinzas volantes	EN 1744-1	% (massa)	Variação dos valores declarados ≤ 6

Quadro 3.2 - Especificações para o filer¹ em misturas betuminosas de vários países.

País	Especificações
E.U.A. [24,25]	<p>Tipos de Filer: pó de pedra, cinzas volantes, cal hidratada, cimento entre outros.</p> <p>Granulometria (mm): 0,6 (100%); 0,3 (95-100%); 0,075 (70-100%)</p> <p>Relação ponderal f/b: 0,6-1,2</p>
Brasil [26, 27]	<p>Tipos de filer: cimento Portland, pó calcário, pó de pedra, cal hidratada, cinzas volantes ou outro material mineral.</p> <p>Granulometria (mm): 0,42 (100%); 0,18 (95-100%); 0,075 (65-100%)</p> <p>Relação f/b: a quantidade de filer a aplicar nas misturas betuminosas é definida através do método de Marshall ou do método granulométrico.</p>
Espanha [28]	<p>Tipos de filer:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Recuperado b) Comercial <p>Granulometria (mm): 2 (100%); 0,125 (85-100%); 0,063 (70-100%)</p> <p>Relação ponderal f/b: varia com a camada e a zona climática:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camada de base: <ul style="list-style-type: none"> a) Frio e quente: 1,0 b) Temperada: 0,9 • Camada de ligação: <ul style="list-style-type: none"> a) Frio e quente: 1,1 b) Temperada: 1,0 • Camada de desgaste: <ul style="list-style-type: none"> a) Frio e quente: 1,2 b) Temperada: 1,1 <p>Para misturas betuminosas de alto módulo a relação ponderal f/b é 1,2-1,3</p>
Bélgica [29]	<p>Tipos de filer:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Recuperado b) Comercial: pó proveniente de pedras naturais ou artificiais, cimento Portland e cinzas volantes. <p>Granulometria: 2 (100%); 0,125 (85-100%); 0,063 (70-100%)</p> <p>Relação volumétrica f/b: Equação (3.3); relação f/b corresponde ao valor médio da relação f/b para $\Delta T_{ab} = 12^{\circ}C$ e $\Delta T_{ab} = 16^{\circ}C$.</p>

¹ As relações f/b consideram o material passado com dimensões inferiores a 0,075mm ou 0,063mm, conforme a série de peneiros utilizada.

Quadro 3.3 - Especificações para as propriedades dos fileres utilizadas em Portugal [17,23,30].

Propriedades do filer	Unidades	Caderno de encargos		
		Ex-JAE (1998)	Brisa (2006)	E.P. (atual)
Tipo de filer	-	Pó de calcário, cimento Portland, cal hidráulica, cinzas volantes.		-Filer recuperado; -Filer comercial (pó de calcário ou cimento Portland)
Granulometria	mm	-0,425 (100%) -0,180 (95-100%) -0,075 (75-100%)		EN 933-10 -2 (100%); -0,125 (85-100%); -0,063 (70-100%)
Qualidade dos finos – valor de azul metileno	g/kg	Máximo de 0,8	n.d. ²	MBF10
Massa volúmica	Mg/m ³	n.d.	n.d.	EN 1097-7 -Valor declarado -Para o filer comercial os a variação dos valores declarados deverão ser ≤ 2
Massa volúmica aparente em querosene	Mg/m ³			NP EN 1097-3 (anexo B) -variação dos valores declarados entre 0,5 e 0,9
Teor em água	%	n.d.	n.d.	EN 1097-5 ≤ 1
Índice de plasticidade	%	≤ 4 (não se aplica ao cimento e à cal hidráulica)	n.d.	n.d.
Vazios de Rigden	%	n.d.	n.d.	EN 1097-4 - $V_{28/45}$
Ensaio de Blaine	m ² /kg	n.d.	n.d.	EN 196-6 -Variação dos valores declarados ≤ 140
Perda ao fogo das cinzas volantes	% (massa)	n.d.	n.d.	EN 1744-1 -Variação dos valores declarados ≤ 6

Recentemente em Portugal, a concessionária Estradas de Portugal S.A. procedeu à revisão dos cadernos de encargos que descrevem as especificações que identificam as metodologias de formulação dos mastiques betuminosos, alterando os intervalos pré-definidos para relação filer-betume, em termos de massa, para uma nova metodologia que determina a relação volumétrica filer-betume a partir das características do betume e filer. Seguidamente, apresentam-se estas duas especificações, que serão usadas para a formulação dos mastiques estudados no presente trabalho:

² n.d. – não definido

- Caderno de encargos da ex-JAE – 1998

A metodologia apresentada por esta especificação propõe que as misturas betuminosas sejam formuladas considerando uma relação fíler/betume, em termos de massa, compreendida entre 1,1 – 1,5 ou 1,3 – 1,5, dependendo do tipo de mistura fabricada. No caso de uma mistura que utilize areia e pó de natureza granítica, a percentagem ponderal de fíler no agregado deve ser superior a 3%, que poderá ser reduzido para 1,5%, se o fíler utilizado for a cal hidráulica [23].

- Caderno de encargos da E.P. – 2009

Atualmente em Portugal, para formulação das misturas betuminosas, é usada uma metodologia que define uma relação volumétrica fíler/betume (ao contrário da antiga especificação, JAE, que define uma relação fíler/betume em termos de massa), calculada através da Equação (3.3),

$$\frac{f}{b} = \frac{(100 - v) \times \Delta T_{ab}}{(1021,2 + \Delta T_{ab} \times v)} \quad (3.3)$$

onde, f/b é a relação volumétrica fíler/betume, v corresponde aos vazios do fíler seco compactado (%), também definido como índice de vazios de Rigden, e ΔT_{ab} diz respeito ao aumento da temperatura de amolecimento anel e bola do mastique em relação ao betume que o originou (°C).

A expressão anterior, Equação (3.3), deverá ser utilizada para valores de ΔT_{ab} de 12°C e 16°C e a relação volumétrica fíler/betume a adotar corresponderá ao valor médio das relações volumétricas f/b obtidas para as temperaturas atrás definidas [18].

A razão de os valores da relação volumétrica f/b serem calculados para as temperaturas de 12°C e 16°C, deve-se aos estudos realizados pelo *Centre de Recherches Routières*, que verificaram a possibilidade de determinar o aumento da temperatura de amolecimento através do índice de vazios de Rigden e da relação volumétrica f/b recorrendo à Equação (3.3). De acordo com os estudos realizados, entre este intervalo as misturas betuminosas apresentam comportamentos mais satisfatórios [21].

Bahia *et al.* [22] apresenta novas metodologias e critérios para o uso de fileres em misturas betuminosas, que resultam da análise das características de vários mastiques em misturas betuminosas. As características dos mastiques e das misturas betuminosas foram determinadas através da realização de ensaios mecânicos que determinam a trabalhabilidade, a resistência ao fendilhamento, a resistência à fadiga, a resistência às deformações permanentes e a sensibilidade à água. A relação fíler/betume dos

mastiques estudados é 1:1 em termos de massa. Os resultados revelaram grande influência na trabalhabilidade e na resistência ao desgaste das misturas. No Quadro 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam-se os métodos de ensaio, as propriedades dos fileres e os limites propostos pelos autores para o cumprimento dos requisitos de trabalhabilidade e resistência ao desgaste. Para a trabalhabilidade, N92 corresponde ao número de rotações do compactador giratório necessárias para a obtenção de um grau de compactação de 92% (relativo à baridade máxima teórica) e para a resistência ao desgaste, Jnr corresponde à flexibilidade por fluência não recuperada.

Quadro 3.4 - Propriedades e métodos de ensaio [22].

Propriedades dos fileres	Métodos de ensaio
Índice de vazios de Rigden (%)	EN 1097-4, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 4: Determinação dos vazios do filer seco compactado.
Granulometria (Expressa como modulo de finura (FM))	ASTM D4465, <i>Particle Size Distribution of Catalytic Material by lase Light Scattering</i> .
Teor em cálcio (expresso em % CaO)	Fluorescência raio-X, ASTM D5381, <i>Standard Guide for X-ray (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders</i> .
Teor em argilas ativas (Expresso pelo valor de azul de metileno (MBV))	AASHTO T 330, <i>The Qualitative Detection of Harmful Clays of the Smectite Group in Aggregates Using Methylene Blue</i> .
Massa volúmica específica (necessária para a determinação do índice de vazios de Rigden)	Método do picnómetro, ASTM D5550, <i>Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer</i> .

Quadro 3.5 – Limites propostos para a trabalhabilidade [22].

N92 máximo	43
Viscosidade relativa máxima aos 135°C	5,0

Quadro 3.6 – Limites máximos propostos para o Jnr do mastique, em termos da dimensão dos agregados [22].

Tipo de agregado	Máximo J _{nr} do mastique a 3,2 kPa (1/kPa)
Fino	0,4
Grosso	0,55

Caso uma destas características não possa ser diretamente medida, foram propostos modelos que estimam as propriedades dos mastiques, considerando as propriedades dos betumes e fileres, a viscosidade do mastique, Equação (3.4), e a rigidez ao corte G do mastique, Equação (3.5).

$$\eta_{mastique} = -8244 + 4,68 \times \eta_{betume} + 205 \times v \quad (3.4)$$

$$G_{mastique,r} = 2,32 + \left[\frac{145 + 4,84 - 1,71CaO}{G_{ligante}} \right] \quad (3.5)$$

em que $\eta_{mastique}$ e η_{betume} é a viscosidade dinâmica do mastique e do betume, respetivamente, v é o índice de vazios de Rigden, $G_{mastique,r}$ é a rigidez ao corte relativa do mastique e $G_{ligante}$ corresponde à rigidez ao corte do ligante.

3.3. Metodologias de determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas por agregados minerais, doseados de forma ponderal ou volumétrica, ligante betuminoso e ar. Após a entrada em serviço, as misturas betuminosas têm que cumprir as seguintes exigências de qualidade: adequada estabilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade, aderência, durabilidade e trabalhabilidade [1].

As misturas betuminosas são divididas em quatro grupos, classificados de acordo com as temperaturas de fabrico: misturas betuminosas a frio (MBF), semi-temperadas (MBST), temperadas (MBT) e quentes (MBQ), Figura 3.4. Nesta figura ilustra-se também o aumento do consumo de combustível com a temperatura de fabrico.

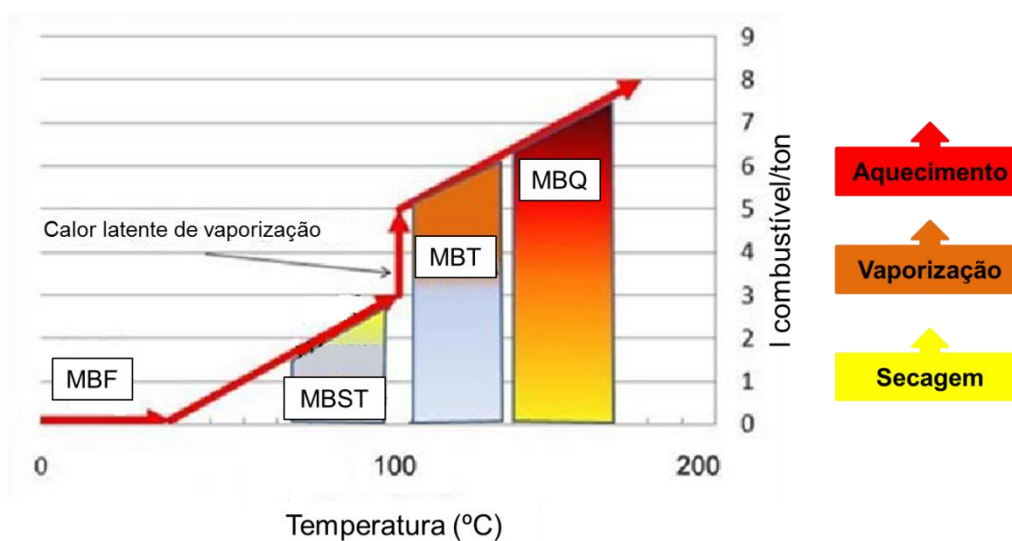


Figura 3.4 - Intervalos de temperaturas para os vários tipos de misturas betuminosas [23]

Adequadas temperaturas durante o processo de fabrico permitem aos ligantes betuminosos um bom envolvimento e revestimento dos agregados. Após o processo de fabrico, procede-se ao transporte para o local de aplicação e à pavimentação e compactação das misturas numa camada de largura e espessura predefinidas. A compactação tem como principal objetivo alcançar um volume de vazios adequado. A estas temperaturas, o betume deve apresentar uma fluidez adequada para lubrificar os agregados, permitindo uma boa compactação. Durante a compactação verifica-se uma redução dos vazios e um aumento da baridade da mistura [3,7].

Com o objetivo de melhorar a qualidades das camadas de misturas betuminosas produzidas, diferentes trabalhos científicos têm proposto metodologias para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas, tendo como base uma análise à viscosidade dos betumes, a várias temperaturas e taxas de corte. Atualmente os métodos de determinação das temperaturas de fabrico e compactação para betumes puros não determinam temperaturas satisfatórias quando aplicados aos betumes modificados. Esta dificuldade resulta da sensibilidade dos betumes modificados à variação da taxa de corte. Para estes, os métodos atuais apresentam limitações de aplicabilidade, determinando temperaturas demasiado elevadas que provocam envelhecimento excessivo, separação do aditivo do betume, libertação de fumos tóxicos, etc [3].

No estudo realizado por Santos [4], algumas metodologias propostas por outros autores foram analisadas para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de betumes modificados com polímero SBS, a partir de betumes refinados na Península Ibérica. Deste estudo, destacam-se duas metodologias que apresentaram resultados mais próximos das temperaturas de fabrico e compactação recomendadas pelos produtores. À metodologia tradicional designada de Superpave, desenvolvida para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de betumes puros, adiciona-se o método da viscosidade a uma taxa de corte elevada (evolução), HSRV-E, e o método Viscosidade a uma taxa de corte zero (simplificação), ZSRV-S, sendo estes dois últimos utilizados na determinação das temperaturas dos betumes modificados.

3.3.1. Método Superpave

O método designado neste trabalho por Superpave (*SUperior PERforming Asphalt PAVEMENTs*) resulta do programa de investigação com o mesmo nome, desenvolvido pelo SHRP, E.U.A.. Entre 1987 e 1993, o SHRP realizou vários programas de desenvolvimento das especificações e métodos para os betumes e misturas betuminosas. Em 1974, o *Asphalt Institute*, recomenda a utilização de viscosidade cinemática das temperaturas de fabrico e compactação de 170 ± 20 cSt e 280 ± 30 cSt, respetivamente, quando a formulação recorre ao método de Marshall para a formulação de misturas [32,33]. Embora o uso destes intervalos de viscosidade cinemática sejam definidas em alguns cadernos de encargos, por exemplo APORBET (1998) e JAE (1998), Khatri *et al.*, citado em [3], afirma que, apesar de serem utilizados como referência há mais de 40 anos, se desconhecem as razões da sua definição inicial. A determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas, especificada nos cadernos de encargos anteriormente referidos, tem como base o diagrama BTCD – *Bitumen Test Chart Data*, desenvolvido por Heukelom, Figura 3.5.

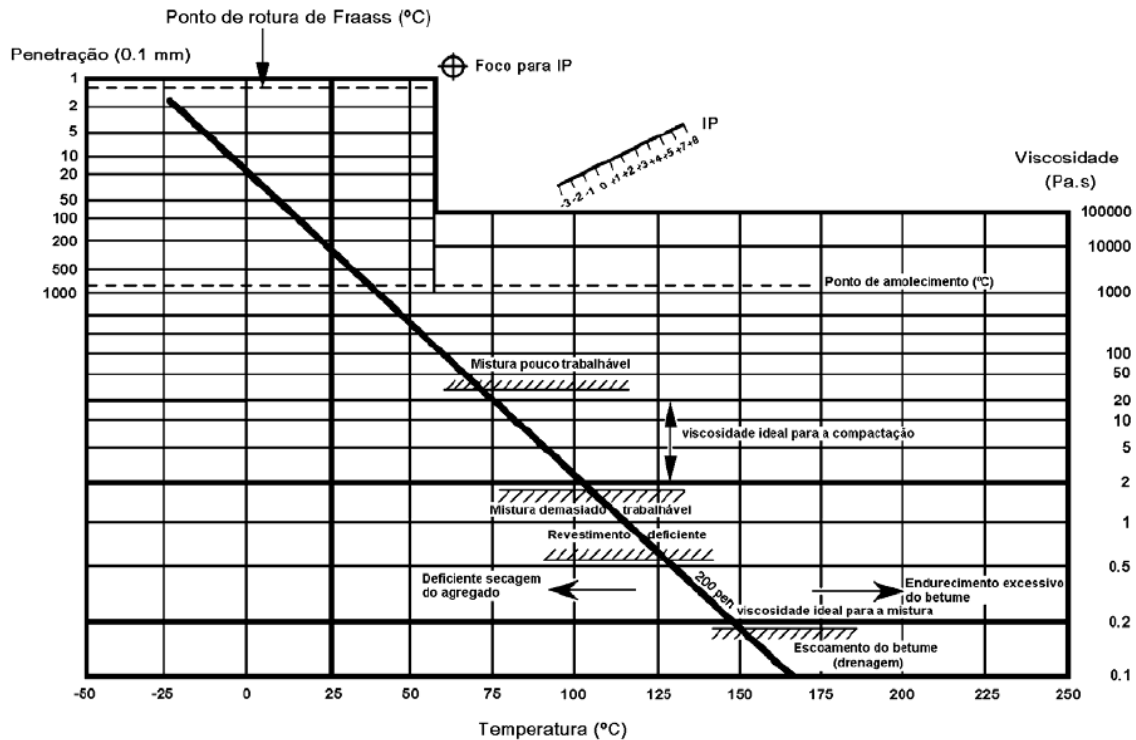


Figura 3.5 – Diagrama BTDC: viscosidades de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes puros [34].

A introdução do método Superpave veio substituir os métodos de formulação de misturas betuminosas de Marshall e de Hveem. Na nova metodologia, são mantidos os intervalos de temperatura recomendados pelo *Asphalt Institute*, à exceção das unidades, que são convertidas para as unidades do Sistema Internacional, *Pa.s*, representativas da viscosidade dinâmica. No manual *Superpave Mix Design*, publicado pelo *Asphalt Institute*, os intervalos da viscosidade dinâmica recomendados para fabrico e compactação são $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa.s}$ e $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$, respetivamente [25,35,36].

O procedimento de determinação das temperaturas define a medição da viscosidade dinâmica, usando um viscosímetro rotativo, com a taxa de corte de $6,8 \text{ s}^{-1}$ para as temperaturas de 135°C e de 165°C . A representação dos valores medidos num gráfico resulta uma relação linear entre a viscosidade dinâmica e a temperatura, Figura 3.6, utilizando uma escala log-log para a viscosidade dinâmica e uma escala logarítmica para a temperatura, permite a obtenção dos valores das temperaturas de fabrico e compactação aplicando os intervalos de viscosidade anteriormente referidos [4,7,32].

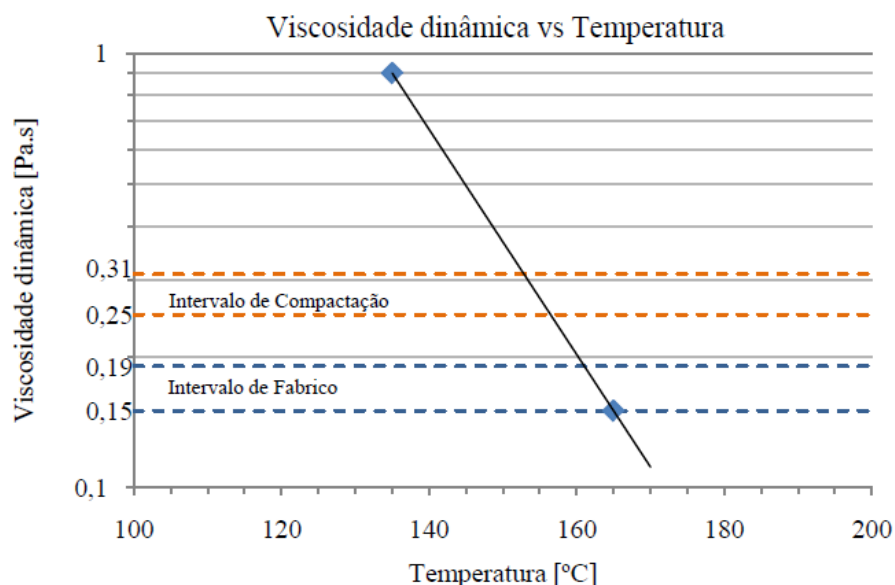


Figura 3.6 – Relação linear entre a viscosidade dinâmica e a temperatura [4]

Este método é uma referência na determinação das temperaturas de fabrico e compactação, sendo apenas de aplicação laboratorial, visto que em condições de obra, as temperaturas dependem de outros fatores, principalmente as temperaturas de compactação [4].

3.3.2. Viscosidade a uma taxa de corte elevada

Este método foi desenvolvido por Yetkin Yildirim e seus colaboradores, apresentado pela primeira vez em 2000, de modo a calcular as temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados considerando o comportamento Não-Newtoniano do tipo *shear-thinning* [36].

O estudo baseou-se na determinação da taxa de corte de betumes modificados durante a compactação, de modo a que o seu efeito pudesse ser incluído durante a medição das viscosidades. Assim, a aplicação das taxas de corte estimadas resultaria na obtenção de temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados razoáveis [7].

O estudo consistiu na preparação de misturas betuminosas utilizando quatro betumes diferentes, dois não modificados e dois modificados, que posteriormente foram compactadas com um compactador giratório (SGC), a baixas temperaturas, entre os 50°C e os 90°C, de modo a aumentar o efeito da temperatura sobre a baridade. Os autores partiram do pressuposto que quando os betumes tivessem a mesma viscosidade, a baridade das misturas betuminosas seria equivalente. Assim sendo, realizaram-se ensaios de medição da viscosidade dos betumes, a várias taxas de corte, recorrendo a um viscosímetro rotativo de Brookfield, de modo a determinar o ponto em que os betumes, não modificados e modificados, têm a mesma viscosidade. Extrapolando os resultados das viscosidades obtidos, obteve-se a taxa de corte a que os betumes, modificados e não modificados, têm a mesma

viscosidade. A hipótese era que a taxa de corte que o betume é submetido durante o processo de compactação, no compactador giratório, é equivalente à taxa de corte obtida através da intersecção da extrapolação das viscosidades dos betumes. Após uma análise dos resultados obtidos para as misturas em estudo, os autores concluíram que a taxa de corte média a que o betume é submetido durante a compactação no compactador giratório é, aproximadamente, 500 s^{-1} .

Para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas através deste método, mede-se as viscosidades dinâmicas dos betumes para várias taxas de corte, dentro dos limites praticáveis pelo viscosímetro rotativo, para as temperaturas de 135°C e 165°C . Seguidamente, recorre-se ao modelo da lei de Cross para estimar os valores da viscosidade de cada betume a uma taxa de corte de 500 s^{-1} . Os resultados obtidos são representados num gráfico que exibe uma relação linear, em escala logarítmica, entre a viscosidade dinâmica e a temperatura, Figura 3.6, determinado assim as temperaturas de fabrico e compactação, que correspondem aos intervalos de viscosidade de $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa.s}$ e $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$, respetivamente [4,36]. Santos [4], designa a versão inicial deste método de “original”.

Posteriormente em 2006, o mesmo autor, apresenta uma outra variante do método acima descrito, que adota intervalos diferentes de viscosidade de fabrico e de compactação, de $0,275 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$ e $0,550 \pm 0,06 \text{ Pa.s}$, respetivamente, designando-se neste trabalho de “evolução”. Estes intervalos têm origem na medição de 50 betumes modificados, de 9 gamas de penetração diferentes e 14 produtores diferentes. Para cada betume calculou-se a viscosidade para várias taxas de corte, à temperatura de 135°C e 165°C . Para a obtenção destes intervalos, foi considerada a média dos intervalos de viscosidade mais frequentes, sendo que o valor escolhido para a viscosidade de compactação mantém-se dentro do limite de duas vezes o intervalo da viscosidade de fabrico [2,4].

Santos [4] conclui que com a aplicação do método da viscosidade a uma taxa de corte elevada resultam temperaturas de fabrico e compactação acima de 180°C , bastante superiores às recomendadas pelos produtores. A aplicação da evolução deste método determinou temperaturas de fabrico dentro dos limites propostos pelos produtores, enquanto os resultados das temperaturas de compactação são, maioritariamente, inferiores às recomendadas.

3.3.3. Viscosidade a uma taxa de corte zero

O conceito da viscosidade a uma taxa de corte zero foi introduzido por Hussein Bahia e seus colaboradores, com o objetivo de determinar as temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados [4,33,36,37].

O estudo teve como principal objetivo a medição da viscosidade de vários betumes modificados e qual o efeito na compactação de misturas betuminosas. Recorrendo a um compactador giratório, verificaram, que durante a compactação, existe um efeito significativo da viscosidade no

volume de vazios das misturas. Assim sendo, realizaram ensaios que correlacionam o volume de vazios com os valores da viscosidade estimados a diferentes taxas de corte, verificando uma melhoria destes valores com a diminuição da taxa de corte a que a viscosidade é medida, concluindo que a taxa de corte a que a viscosidade é medida, é a taxa de corte zero. Esta premissa é verificada na determinação da taxa de corte no compactador giratório, obtendo-se para 54% das rotações ou tempo de compactação, taxas de corte inferiores a $0,01 \text{ s}^{-1}$.

O critério usado para estabelecer uma viscosidade, à taxa de corte zero ($0,000 \text{ s}^{-1}$), adequada, foi que as temperaturas de compactação e de fabrico não devessem exceder os 150°C e os 160°C , respetivamente. Através da análise dos dados obtidos, foram considerados os valores de $6,0 \text{ Pa.s}$ e $3,0 \text{ Pa.s}$, para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de betumes modificados, respetivamente. A escolha do valor correspondente ao fabrico, é baseada no facto de ser 50% inferior ao valor definido para a compactação e por se ter obtido temperaturas de fabrico máximas de 165°C .

Contudo, os autores consideram o termo “taxa de corte zero” de difícil compreensão devido à impossibilidade de medição, visto recorrer a equações complexas. A procura de uma taxa de corte baixa de modo a substituir o conceito de taxa de corte zero, culminou na aplicação dos mesmos intervalos de viscosidade, $6,0 \text{ Pa.s}$ e $3,0 \text{ Pa.s}$, para o cálculo das temperaturas, testadas num intervalo de taxa de corte entre os $0,0001 \text{ s}^{-1}$ e $0,1 \text{ s}^{-1}$. A análise dos dados recolhidos, permitiu a determinação das temperaturas de fabrico e compactação para uma taxa de corte de $0,001 \text{ s}^{-1}$. A viscosidade a esta taxa de corte, é estimada através da aplicação do modelo da lei de Cross.

Outra variante do método original estudada pelos autores, foi a medição da viscosidade à taxa de corte de $6,8 \text{ s}^{-1}$, estabelecida no método Superpave. Introduzindo o critério de viscosidade a uma taxa de corte baixa, foram definidos dois novos intervalos de viscosidade para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação, $0,75 \pm 0,05 \text{ Pa.s}$ e $1,4 \pm 0,10 \text{ Pa.s}$, respetivamente. Com esta abordagem, conseguiu-se uma redução de 40°C , aproximadamente, das temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas em comparação com as temperaturas padrão. Stuart define um intervalo da viscosidade de compactação de $1,1 \pm 0,20 \text{ Pa.s}$, ligeiramente inferior ao intervalo atrás mencionado [33]. Santos [4] conclui, que este intervalo determina temperaturas de fabrico e compactação mais próximas das propostas pelos produtores. O mesmo autor designa este método como “simplificação”.

Para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas através deste método, mede-se a viscosidade dinâmica do betume para várias taxas de corte, dentro dos limites praticáveis pelo viscosímetro rotativo, para as temperaturas de 120°C , 135°C e 165°C .

Dado que, as taxas de corte definidas pelos métodos referidos nesta subsecção não se encontram nos limites praticáveis pelo viscosímetro de Brookfield, as viscosidades para as várias taxas de corte mencionadas foram estimadas recorrendo ao modelo de Cross. As temperaturas de fabrico e compactação são obtidas através de uma representação gráfica que relaciona a viscosidade dinâmica e a temperatura, Figura 3.6.

A aplicação deste método para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados revelou, para alguns dos betumes modificados estudados, temperaturas demasiado baixas, pelo que os autores recomendam a realização de mais estudos para a utilização deste método seja recomendada.

3.3.4. Resumo

No quadro 3.7, apresenta-se um resumo dos métodos usados para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação.

De modo a simplificar a referência às metodologias de determinação das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes, designa-se por HSRV-E o método da viscosidade a uma taxa de corte elevada – evolução (*High Shear Rate Viscosity – Evolution*) e por ZSRV-S o método da viscosidade a uma taxa de corte zero – simplificação (*Zero Shear Rate Viscosity – Simplification*).

Quadro 3.7 – Metodologias de determinação das temperaturas e fabrico e compactação.

Método	Medições		Intervalos de viscosidade (Pa.s)	
	Temperatura (°C)	Taxa de Corte (s ⁻¹)	Fabrico	Compactação
Superpave	135 e 165	6,8	0,17±0,02	0,28±0,03
HSRV-E	135 e 165	500	0,275±0,03	0,55±0,06
ZSRV-S	120, 135 e 165	6,8	0,75±0,05	1,10 ±0,020

4. Programa Experimental

4.1. Introdução

O presente capítulo apresenta o programa experimental, sendo identificados os betumes puros e modificados usados no fabrico dos mastiques betuminosos em estudo, tal como os fíleres que constituem os mastiques betuminosos.

Descreve-se o processo usado na modificação dos betumes puros e no fabrico dos mastiques betuminosos, as metodologias usadas na formulação dos mastiques sendo ainda realizado um estudo sobre a sedimentação do fíler em cada tipo de betume. Por fim, expõem-se os resultados obtidos para os betumes puros e modificados e para os mastiques seguidos da respetiva análise crítica.

4.2. Betumes Puros e Modificados

Para a realização deste estudo foram utilizados dois betumes provenientes da Refinaria de Matosinhos da Galp, com classes de penetração diferentes, 35/50 e 50/70. As amostras recolhidas dos betumes puros pertencem todas ao mesmo lote, de modo a obter resultados fidedignos.

A modificação dos betumes puros foi realizada nas instalações do laboratório NIDIM. Os betumes foram modificados com duas percentagens de polímero SBS, 2% e 4%, em relação à massa do betume modificado a preparar.

De forma a facilitar a leitura do texto, cada betume modificado será distinguido de acordo com a classe de penetração original e a percentagem de polímero adicionado ao betume. Exemplificando, o betume B 35/50 PMB2 diz respeito a um betume da classe 35/50 com 2% de polímero SBS em relação à massa de betume modificado a preparar. A sigla “PMB” é proveniente da terminologia anglo-saxónica *Polymer Modified Bitumen*.

4.2.1. Processo de modificação dos betumes

A modificação dos betumes puros foi realizada segundo o procedimento de modificação de betumes interno ao laboratório NIDIM. Como já anteriormente referido, os betumes puros foram modificados com duas percentagens de polímero SBS, 2% e 4%, em relação à massa do betume modificado a preparar.

No Quadro 4.1, apresentam-se as percentagens dos reagentes empregados na preparação dos betumes modificados. Cada percentagem corresponde à quantidade usada de cada reagente, relativamente à massa total de betume modificado a fabricar.

Quadro 4.1 – Percentagens dos reagentes usados na preparação dos betumes modificados.

Reagente	Tipo	Percentagens (%)	
Betume	35/50 e 50/70	97,5	95,5
Polímero	SBS	2	4
Extrato Aromático	NF 100	0,5	0,5

O polímero mais utilizado na modificação de betumes é o elastómero estireno-butadieno-estireno, designado SBS a partir da terminologia anglo-saxónica *Styrene Butadiene Styrene*. Ao incorporar SBS nas misturas betuminosas verifica-se um aumento no ponto de amolecimento e uma redução da penetração a 25°C do betume. Outro benefício da sua aplicação é o facto de proporcionar às misturas betuminosas menor suscetibilidade térmica, maior flexibilidade, aumentando a resistência à deformação permanente, maior resistência ao envelhecimento durante a utilização e uma melhor adesividade aos agregados favorecendo a colagem entre as diferentes camadas [1,34].

No que diz respeito ao extrato aromático do tipo NF 100, este tem como principal finalidade estabilizar o processo de fabrico.

Os betumes base foram modificados seguindo o seguinte protocolo experimental:

- Definição das quantidades necessárias dos reagentes para a modificação do betume base;
- Agitar o betume puro a uma velocidade constante até atingir a temperatura de $165\pm 5^{\circ}\text{C}$ de modo a obter uma boa homogeneização;
- Adicionar a quantidade de polímero SBS desejada e manter a agitação até atingir uma temperatura constante de 175°C ;
- Juntar o extrato aromático NF100 mantendo a agitação a uma temperatura constante;
- Retirar amostras para a realização dos ensaios de caracterização do betume modificado, descritos em 4.3;
- Armazenamento do betume para posterior fabrico dos mastiques betuminosos.

O processo de modificação teve uma duração de 150 minutos. Após a realização dos ensaios de caracterização dos betumes modificados, os betumes foram devidamente armazenados em latas metálicas, com capacidade de 1kg, de modo a evitar demasiados ciclos de arrefecimento/aquecimento durante o processo de fabrico dos mastiques betuminosos.

4.3. Ensaios de caracterização de betumes

4.3.1. Penetração – EN 1426:2007

Este ensaio está especificado na norma europeia EN 1426 e tem como objetivo a determinação da consistência de betumes e de ligantes betuminosos à temperatura de serviço [38].

Define-se por penetração, a profundidade, expressa em décimos de milímetros, que penetra no betume uma agulha normalizada sob determinadas condições de temperatura (25°C), de carga (100g) e de duração de carga (5s).

O ensaio inicia-se com o enchimento da cápsula de penetração até uma altura que, uma vez arrefecida à temperatura ambiente, seja 10 mm superior à penetração expectável. Imediatamente, a cápsula é coberta com um vidro de relógio, para evitar a formação de bolhas de ar e acumulação de pó. Deixa-se arrefecer a amostra durante 90 minutos à temperatura ambiente sendo posteriormente colocada no banho a 25°C durante 90 minutos, com o objetivo de homogeneizar a temperatura. Depois deste processo, inicia-se a determinação da penetração do betume com o auxílio do penetrómetro semi-automático. São realizadas três penetrações, utilizando três agulhas de penetração diferentes, distanciadas entre si no máximo 10mm e distanciadas das paredes no máximo 10mm. O valor da penetração do betume, corresponde à média aritmética dos três valores obtidos. Na Figura 4.1, apresenta-se o equipamento usado na realização do ensaio.



Figura 4.1 – Banho a 25°C (esquerda), Penetrómetro (centro) e Agulhas de penetração (direita).

4.3.2. Temperatura de amolecimento – Método do anel e bola – EN 1427:2007

Entende-se por ponto de amolecimento, a temperatura que um material, sob certas condições de teste normalizadas, atinge uma determinada consistência [39].

Tendo como base a EN 1427, este ensaio consiste na colocação de duas esferas de aço sobre duas amostras de betume contidas em anéis de latão, aquecidos com uma taxa de temperatura

controlada num banho. O ponto de amolecimento é obtido quando o betume contido nos anéis amolece suficientemente permitindo o atravessamento das esferas.

Começa-se por aquecer os anéis a aproximadamente 90°C acima do ponto de amolecimento expectável. Para os betumes modificados preparam-se 4 anéis para o caso de ser necessário repetir o teste. Colocam-se os anéis no suporte, revestido com uma agente libertador, e procede-se com enchimento dos mesmos, colocando ligante betuminoso em excesso, ficando a arrefecer durante 30 minutos. Seguidamente limpa-se o excesso de ligantes dos anéis com o auxílio de uma espátula quente, de modo a que a amostra fique lisa e alinhada com a superfície dos anéis.

De seguida colocam-se os anéis no suporte e introduzem-se no banho selecionado, durante 15 minutos, de acordo com o ponto de amolecimento espectável. Para pontos de amolecimento entre 28°C e 80°C, usa-se água destilada ou água desionizada, sendo a temperatura inicial do banho de 5°C ± 1°C. Para pontos de amolecimento entre 80°C e até 150, usa-se glicerina, com temperatura inicial de 30°C ± 1°C. Passados os 15 minutos de estabilização da temperatura inicial do ensaio, colocam-se as esferas nas guias de suporte e coloca-se o copo de precipitação no aparelho de ensaio. Durante o ensaio o banho é agitado de modo a que seja aquecido a uma velocidade de 5°C/min. O ponto de amolecimento é obtido quando as esferas atingem o prato inferior do suporte. O valor da temperatura de amolecimento, ou temperatura anel e bola (T_{ab}) corresponde à média aritmética dos valores obtidos para cada esfera. Na Figura 4.2, apresenta-se o equipamento usado na realização do ensaio.



Figura 4.2 – Equipamento de medição da temperatura de amolecimento (esquerda) e Suporte, anéis e esferas (direita).

4.3.3. Viscosidade dinâmica usando o viscosímetro rotativo – EN 13302:2010

Realizado em conformidade com a EN 13302, este ensaio tem como finalidade a determinação da viscosidade dinâmica dos betumes, através da aplicação de um binário que permite a medição da resistência à rotação da haste a uma velocidade constante [40]. O aparelho utilizado nos estudos realizados neste trabalho é o viscosímetro rotativo Brookfield DV-II+Pro.

Antes de dar início ao ensaio é necessário aquecer a amostra a uma temperatura até 80°C acima do ponto de amolecimento expectável ou, no máximo, 200°C dependendo da que for menor. Previamente, a câmara de amostra é também aquecida ao mesmo tempo que a haste pretendida para o estudo é introduzido no interior da unidade de aquecimento, *thermosel*, a aquecer, facilitando a sua introdução na câmara de ensaio com betume. Após este procedimento, verte-se o volume de amostra necessário para a câmara de ensaio, de modo a que, ao ser introduzido a haste na câmara de amostra, este fique completamente coberto. Depois de verificada a estabilização da temperatura da haste e da unidade de aquecimento, coloca-se a câmara de amostra cheia na unidade de aquecimento, deixando estabilizar durante 15 a 30 minutos, dependendo da gama de temperatura a ser estudada. Para que a estabilização seja mais rápida, deixa-se a haste a rodar a uma taxa de corte baixa. Após um período de estabilização de cerca de 60 ± 5 s retira-se o valor da viscosidade dinâmica à taxa de corte pretendida.

De acordo com o manual do viscosímetro Brookfield utilizado, a mudança da haste deverá ser realizada sempre que os valores da viscosidade dinâmica não estejam compreendidos num intervalo de binário entre os 10% e 100% do valor máximo. No Quadro 4.2 apresentam-se os intervalos de funcionamento definidos para cada haste. Na Figura 4.3, apresenta-se o equipamento usado na realização do ensaio.

Quadro 4.2 - Intervalos de funcionamento para cada haste [9].

Haste	Viscosidade [Pa.s]	
	Min	Max
21	25	500
27	125	2,500
28	250	5,000



Figura 4.3 – Viscosímetro rotativo de Brookfield, *Thermosel*, regulador de temperatura (esquerda); Câmara de amostra (centro); Haste/*Spindles* e veios (esquerda)

4.3.4. Dispersão do polímero em betumes modificados – EN 13632:2010

Realizado de acordo com a EN13632, pretende-se com este ensaio verificar a correta distribuição do polímero em betumes modificados através do microscópio de fluorescência. Este método é aplicado à maioria dos polímeros usados e deve ser aplicado apenas para efeitos de identificação em conexão com a produção [41].

O ensaio consiste em verter uma porção da amostra, com o auxílio de uma vareta, para uma tira de papel. Depois de a amostra arrefecer, coloca-se numa câmara fria a temperaturas negativas. Depois destes procedimentos, visualiza-se a amostra no microscópio de fluorescência fazendo-se o devido registo da imagem obtida. Através da análise da imagem obtida classifica-se o betume modificado de acordo com as seguintes características:

- Fase contínua: fase contínua de polímero (P), fase contínua de betume (B) ou as duas fases anteriores em simultâneo (X);
- Descrição da fase: homogénea (H) ou heterogénea (I);
- Tamanho das partículas: pequenas (S), médias (M) e grandes (L);
- Forma das partículas: redondas (r), listras (s) ou outro (o).

4.4. Resultados dos ensaios de caracterização dos betumes

4.4.1. Betumes Puros

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos para a caracterização dos betumes puros usados para o fabrico dos mastiques betuminosos. No Quadro 4.3 apresentam-se os resultados da penetração (Pen_{25}) e da temperatura de amolecimento (T_{ab}) de acordo com as normas usadas e o índice de penetração de cada betume, que exprime a dependência do betume relativamente à temperatura, Equação (4.1), onde T_{ab} corresponde à temperatura de amolecimento do betume e Pen_{25} é a penetração a 25°C do betume [34]. No anexo A apresentam-se os gráficos representativos do comportamento reológico dos betumes puros.

$$IPen = \frac{20 \times T_{ab} + 500 \times \log(Pen_{25}) - 1955,5}{T_{ab} - 50 \times \log(Pen_{25}) + 120,15} \quad (4.1)$$

Quadro 4.3 – Resultados da caracterização dos betumes puro.

Propriedades	Norma	Betume Puro	
		35/50	50/70
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	41,5	62,5
T _{ab} (°C)	EN 1427	51,8	48,5
Índice de Penetração	EN 1426	-1,2	-1,1

Os resultados apresentados nos Quadros 4.4 e 4.5 representam os valores obtidos para a viscosidade dinâmica dos betumes puros B 35/50 e B 50/70, respetivamente, medidos a diferentes taxas de corte para várias temperaturas.

Quadro 4.4 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o betume B 35/50.

B 35/50											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
2,8	6,2250	6,8	1,5440	13,6	0,6438	18,6	0,3094	37,2	0,1525	55,8	0,0987
5,6	6,2563	13,6	1,5478	20,4	0,6432	37,2	0,3097	55,8	0,1520	74,4	0,0983
11,2	6,2594	20,4	1,5468	27,2	0,6445	55,8	0,3115	74,4	0,1513	93	0,0986
16,8	6,2740	27,2	1,5524	34	0,6441	74,4	0,3105	93	0,1518	112	0,0984

Quadro 4. 5 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o betume B 50/70.

B 50/70											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
3,4	4,4215	10,2	1,0989	18,6	0,4622	46,5	0,2318	55,8	0,1272	93	0,0739
6,8	4,3936	17	1,0956	27,9	0,4598	65,1	0,2310	74,4	0,1283	112	0,0740
10,2	4,3835	23,8	1,0965	37,2	0,4608	83,7	0,2308	93	0,1275	130	0,0738
13,6	4,3898	30,6	1,0978	46,5	0,4610	112	0,2326	112	0,1274	149	0,0736

4.4.1.1. Discussão dos resultados

Através da análise dos resultados obtidos verifica-se que ambos os betumes cumprem as exigências de conformidades, de acordo com a NP EN 12591 [42]. No Quadro 4.6, constam os limites mínimos e máximos das características de cada classe estudada que comprovam a afirmação anterior.

Quadro 4.6 – Exigências de conformidade para os betumes puros.

Propriedades	Norma	Betume Puro			
		35/50		50/70	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	50	35	70	50
T _{ab} (°C)	EN 1427	58	50	54	46

Em relação ao comportamento reológico dos betumes, observa-se um comportamento Newtoniano em ambos betumes, visto que não há significativa variação da viscosidade com a taxa de corte em cada temperatura de estudo. Como o betume B 35/50 é mais duro observam-se viscosidades superiores em relação ao betume B 50/70, embora a diferença entre ambas não seja muito acentuada.

Com o aumento da temperatura, a viscosidade dos betumes diminui, mantendo-se constante com variação da taxa de corte para os betumes puros.

A suscetibilidade dos betumes com a temperatura é muito semelhante de acordo com o índice de penetração.

4.4.2. Betumes modificados

A apresentação dos resultados referentes aos betumes modificados é abordada de forma diferente comparativamente com os resultados dos betumes puros, isto é, além dos resultados de caracterização dos betumes, expõem-se imagens relativamente a homogeneidade do polímero e é efetuada uma análise da variação dos valores da penetração e da temperatura de amolecimento com o respetivo betume puro. Como já foi referido anteriormente, os betumes modificados foram fabricados laboratorialmente, utilizando duas percentagens do polímero SBS, 2% e 4%, para cada gama de penetração.

Cada subsecção corresponde a um betume modificado na qual se apresentam os valores da penetração e da temperatura de amolecimento juntamente com a variação verificada em relação ao betume puro, o índice de penetração, uma imagem microscópica da homogeneidade do betume e um quadro com os valores da viscosidade dinâmica registados no viscosímetro de Brookfield. No Anexo B apresentam-se os gráficos representativos do comportamento reológico dos betumes modificados a diferentes temperaturas e as equações da lei de potência e modelo de Cross. As equações obtidas para o modelo de Cross foram determinadas com recurso a um algoritmo matemático programado em Matlab.

4.4.2.1. Betume modificado B 35/50 PMB2

Quadro 4.7 - Resultados da caracterização do betume modificado B 35/50 PMB2

Propriedades	Norma	B 35/50 PMB2	Δ
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	42,3	-0,8
T _{ab} (°C)	EN 1427	56,9	5,1
Índice de Penetração	EN 1426	0,0	-

Quadro 4.8 - Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 35/50 PMB2

B 35/50 PMB2											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	15,9000	3,4	3,0250	13,6	1,1485	20,4	0,6453	18,6	0,3631	37,2	0,2206
2,8	14,8938	6,8	2,9015	20,4	1,1255	27,2	0,6407	37,2	0,3622	74,4	0,2201
5,6	14,1969	13,6	2,8678	27,2	1,1122	34	0,6400	55,8	0,3605	112	0,2195
8,4	13,6540	20,4	2,8044	34	1,1044	40,8	0,6399	74,4	0,3599	149	0,2189

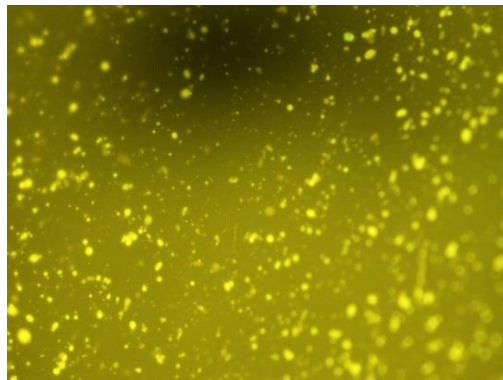


Figura 4.4 – Dispersão do polímero SBS no betume B35/50 PMB2

4.4.2.2. Betume modificado B 35/50 PMB4

Quadro 4.9 – Resultados da caracterização do betume modificado B 35/50 PMB4

Propriedades	Norma	B 35/50 PMB 4	Δ
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	39,9	1,6
T_{ab} (°C)	EN 1427	70,2	18,4
Índice de Penetração	EN 1426	2,3	-

Quadro 4.10 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 35/50 PMB4

B 35/50 PMB4									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
5,6	5,2219	6,8	2,1000	10,2	1,2455	9,3	0,7069	18,6	0,4300
11,2	4,8845	13,6	2,0580	20,4	1,2495	18,6	0,6978	37,2	0,4244
16,8	4,6429	20,4	2,0140	30,6	1,2529	37,2	0,6900	55,8	0,4216
22,4	4,5473	27,2	1,9791	40,8	1,2530	55,8	0,6856	74,4	0,4195

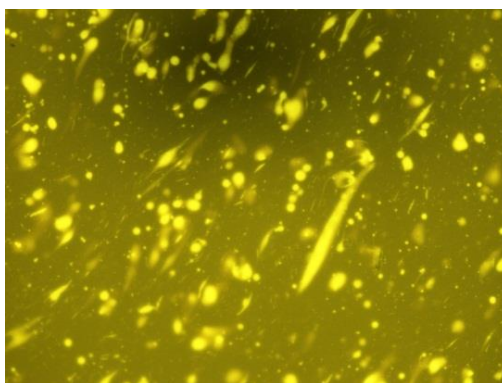


Figura 4.5 – Dispersão do polímero SBS no betume B35/50 PMB4

4.4.2.3. Betume modificado B 50/70 PMB2

Quadro 4.11 – Resultados da caracterização do betume modificado B 50/70 PMB2

Propriedades	Norma	B 50/70 PMB2	Δ
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	52,9	9,6
T _{ab} (°C)	EN 1427	57,6	9,1
Índice de Penetração	EN 1426	0,7	-

Quadro 4.12 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 50/70 PMB2

B 50/70 PMB2											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
2,8	11,0250	3,4	2,8750	13,6	1,3148	27,2	0,6367	37,2	0,3342	74,4	0,1976
5,6	10,8341	10,2	2,8709	20,4	1,3058	55,8	0,6346	55,8	0,3295	112	0,1946
8,4	10,7190	17	2,8612	27,2	1,2990	74,4	0,6303	74,4	0,3262	149	0,1921
11,2	10,6064	23,8	2,8425	34	1,2925	93	0,6280	93	0,3244	186	0,1897

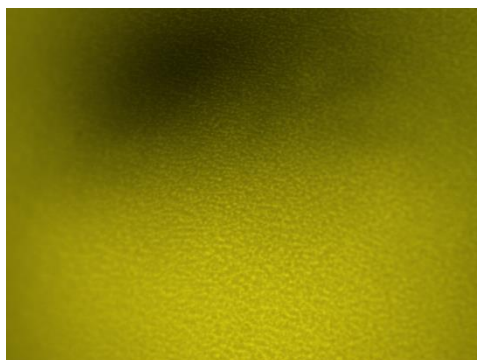


Figura 4.6 – Dispersão do polímero SBS no betume B 50/70 PMB2

4.4.2.4. Betume modificado B 50/70 PMB4

Quadro 4.13 - Resultados da caracterização do betume modificado B 50/70 PMB4

Propriedades	Norma	B 50/70 PMB4	Δ
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	42,7	19,8
T_{ab} (°C)	EN 1427	78,3	29,8
Índice de Penetração	EN 1426	3,7	-

Quadro 4.14 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte do betume B 50/70 PMB4

B 50/70 PMB4									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
5,6	6,0219	6,8	2,5565	13,6	1,2875	20,4	0,7052	18,6	0,4019
8,4	5,9878	10,2	2,5355	20,4	1,2733	27,2	0,6969	37,2	0,3975
11,2	5,9800	13,6	2,5201	27,2	1,2705	34	0,6925	55,8	0,3963
14	5,9600	17	2,5106	34	1,2659	40,8	0,6888	74,4	0,3957

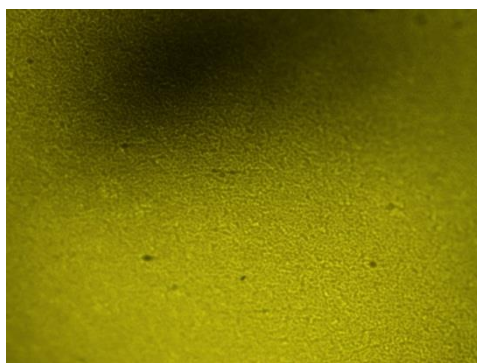


Figura 4.7 – Dispersão do polímero SBS no betume B 50/70 PMB4

4.4.2.5. Discussão dos resultados

A EN 14023 estabelece as propriedades e metodologias de ensaios a ser aplicadas aos betumes modificados com polímeros [43]. Na versão provisória do anexo nacional da norma EN14023 encontra-se a especificação para os betumes modificados com polímeros mais utilizados em Portugal. No Quadro 4.15, apresentam-se as características dos betumes modificados com polímeros, PMB 25/55-65 e PMB 45/80-60, que irão servir de base de comparação com os betumes modificados usados.

Quadro 4.15 – Requisitos para as características dos betumes modificados

Propriedades	Norma	Betume Modificado			
		PMB 25/55-65		PMB 45/80-55	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	EN 1426	25	55	45	80
T _{ab} (°C)	EN 1427	≥ 65		≥ 55	

Conclui-se que as propriedades analisadas da maioria dos betumes estão em conformidade com exigências requeridas pela EN 14023 com a exceção do betume modificado B 35/50 PMB2, que apresenta uma temperatura de amolecimento inferior à exigida.

Como era de esperar, todos os betumes, excetuando o betume B 35/50 PMB2, exibem um aumento da temperatura de amolecimento e uma diminuição da penetração.

Os betumes mais duros apresentam maior dificuldade de dissolução do polímero, visto que apresentam viscosidades superiores [44]. Esta dificuldade reflete-se no valor da penetração do betume B 35/50 PMB2, que contém uma quantidade baixa de polímero SBS, e nos valores das viscosidades dos betumes modificados de cada classe.

No que diz respeito às viscosidades dinâmicas dos betumes modificados, verifica-se a diminuição da viscosidade com o aumento da taxa corte, concluindo assim que os betumes modificados têm um comportamento não-Newtoniano do tipo *shear-thinning*. A diminuição da viscosidade com a taxa de corte é mais acentuada para temperaturas mais baixas. Verifica-se que os betumes modificados da classe 50/70 em comparação com os betumes modificados da classe 35/50, exibem viscosidades superiores para temperaturas mais baixas. Para temperaturas superiores, mais propriamente a 165°C e 180°C, verifica-se que os betumes modificados da classe 50/70 apresentam viscosidades ligeiramente inferiores em relação aos betumes modificados da classe 35/50. Este comportamento surge devido ao betume puro da classe 35/50 exibir viscosidades superiores em relação à classe 50/70, apresentando uma maior dificuldade de dissolução do polímero.

Analisando as imagens referentes a dispersão do polímero, verifica-se que todos os betumes modificados apresentam uma dispersão homogénea, constatando-se que a reação química do polímero SBS com o betume é maior na classe 50/70. Cada imagem reflete ainda a percentagem de polímero

SBS usada na modificação dos betumes puros. Pela EN 13632, os betumes modificados estudados podem ser classificados da seguinte forma:

- B 35/50 PMB2: B/H/S/r
- B 35/50 PMB4: B/H/SM/o
- B 50/70 PMB2: B/H/S/r
- B 50/70 PMB4: B/H/S/r

4.5. Fíleres

Na presente secção são apresentados os tipos de fíleres utilizados na produção dos mastiques betuminosos. Posteriormente será abordado o problema da sedimentação do fíler durante os ensaios.

Para o fabrico dos vários mastiques betuminosos foram escolhidos três tipos diferentes de fíleres de origem calcária, dois obtidos através da moagem do calcário, com diferentes granulometrias, fíleres RC480 e RC590, e o terceiro a cal hidráulica-NHL5, apresentados na Figura 4.8. Os fíleres RC480 e RC590 foram fornecidos pela EUROCALCIO e a cal hidráulica pela SECIL.



Figura 4.8 – Fíler RC480 (esquerda); Fíler RC590 (centro); Cal-NHL5 (direita)

No Quadro 4.16 apresentam-se as principais características usadas como referência durante a execução do trabalho experimental.

No Anexo E, expõem-se as fichas técnicas dos fíleres cedidos pelos fornecedores.

Quadro 4.16 – Características principais dos fíleres

Fíler	Granulometria (% dos passados em massa)			Massa Volúmica (Mg/m ³)	Índice de vazios de Rigden ³ (%)
	2 mm	0,125 mm	0,063 mm		
RC480	100-100	100-98	88,5-78,5	2,71	32
RC590	100-100	99-98	95-85	2,68	-
NHL5	100-100	100-90	85-75	2,70-2,90	28-45

Posteriormente, para o cálculo das relações f/b dos mastiques, visto que algumas das características dos fíleres, apresentadas na Quadro 4.16, não foram fornecidas pelos produtores,

³ Também designado de vazios do fíler seco compactado.

considerou-se para o fíler RC590 o mesmo valor do índice de vazios de Rigden que o RC480, devido a terem uma granulometria semelhante, e para a cal hidráulica considerou-se o valor médio dos intervalos de valores fornecidos.

4.5.1. Análise da sedimentação dos Fíleres

O problema da sedimentação durante os ensaios da viscosidade dinâmica, usando um viscosímetro rotativo, é mencionado no estudo realizado por Airey e Westwood [11]. Ao analisar os resultados da viscosidade dinâmica em relação ao tempo, os autores verificaram uma acentuada redução da viscosidade que após, aproximadamente, dez minutos estabiliza, atribuindo a causa deste fenómeno à sedimentação do fíler, a um aquecimento localizado e ao esforço inicial dado à haste, necessário para movimentar e acelerar as partículas de fíler em suspensão, até atingir uma taxa de corte constante, como se pode verificar na Figura 4.9 [12].

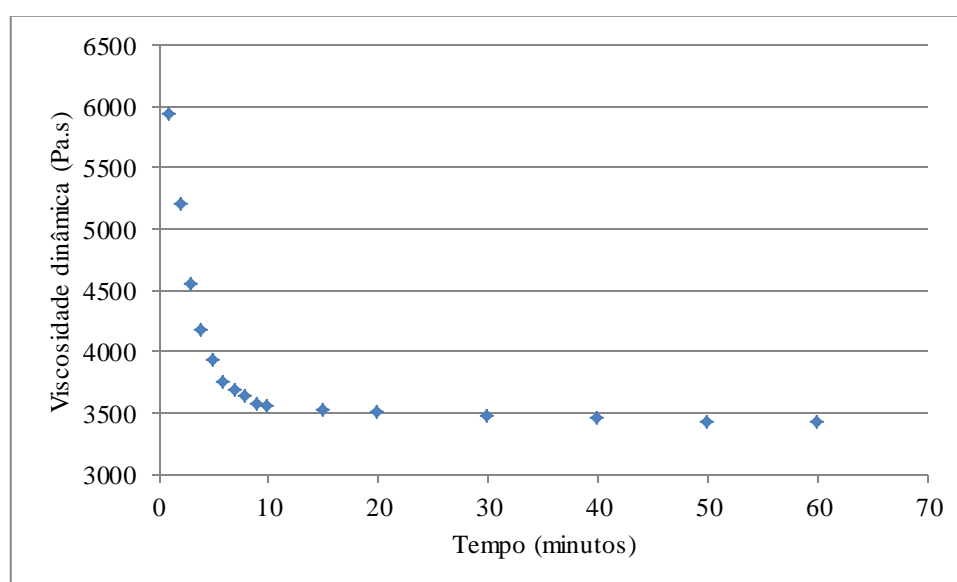


Figura 4.9 – Viscosidade vs. Tempo (Mastique com betume B 35/50 + Cal-NHL5)

De modo a investigar o efeito da sedimentação dos diferentes tipos de fíleres nos mastiques betuminosos estudados, os autores anteriormente mencionados, propuseram a utilização da Lei de Stokes, Equação (4.1), obtendo assim a velocidade de sedimentação dos diferentes fíleres para os diversos tipos de betumes. Segundo a Lei de Stokes, a velocidade de sedimentação de uma partícula sólida imersa num meio líquido é diretamente proporcional ao quadrado do seu diâmetro e à diferença da sua densidade em relação ao meio líquido, sendo inversamente proporcional à viscosidade do fluido. A Lei de Stokes descreve a ação da força gravítica durante o processo de sedimentação de uma partícula sólida [12,36].

$$v = \frac{d^2}{18\eta}(\rho_s - \rho_f)g \quad (4.1)$$

Em, que v é a velocidade de sedimentação em m/s , d é o diâmetro da partícula em m , η é a viscosidade dinâmica do fluido em $Pa.s$, ρ_s e ρ_f dizem respeito, respectivamente, à densidade da partícula em Kg/m^3 e do fluido e g é a aceleração gravítica em m/s^2 .

Nos quadros 4.17 e 4.18 apresentam-se os tempos calculados para partículas de fíler, com um diâmetro de $0,063 \text{ mm}$, tendo em consideração as viscosidade dos betumes puro, sabendo que apresentam viscosidades dinâmicas inferiores aos betumes modificados. Como em todos os fíleres utilizados a maiorias das partículas têm diâmetros inferiores $0,063 \text{ mm}$, os tempos obtidos são considerados válidos, respeitando os tempos de ensaio necessários para o cálculo das viscosidades dos mastiques.

Quadro 4.17 – Tempos previstos para a sedimentação dos fíler no betume B 35/50.

Fíler	Betume	B 35/50					
	T (°C)	100	120	135	150	165	180
RC480	t (min)	2190	542	225	108	53	35
RC590		2151	532	221	106	52	33
NHL5		2041	505	210	101	49	32

Quadro 4.18 – Tempos previstos para a sedimentação dos fíler no betume B 50/70.

Fíler	Betume	B 50/70					
	T (°C)	100	120	135	150	165	180
RC480	t (min)	1539	384	161	81	45	26
RC590		1512	377	159	80	44	25
NHL5		1435	358	151	76	42	24

4.6. Mastiques betuminosos

Neste subcapítulo, são apresentadas as metodologias usadas para a formulação dos mastiques betuminosos e o seu processo de fabrico.

Os ensaios realizados para a caracterização dos mastiques betuminosos são os mesmos descritos na secção 4.3, excetuando a análise microscópica. Os ensaios com maior importância na caraterização dos mastiques estudados neste trabalho, são os ensaios de determinação da temperatura de amolecimento e a determinação da viscosidade.

4.6.1. Metodologias de formulação dos mastiques betuminosos

Neste trabalho foram estudados duas relações fíler-betume para cada combinação de fíler e betume, de acordo com as especificações implementadas na formulação de misturas betuminosas, apresentadas na secção 3.2. No Quadro 4.19 é apresentado um resumo das exigências de cada metodologia. De modo a facilitar a leitura deste trabalho, a formulação proposta pelo caderno de encargos da E.P. (2009) [18] é designada de Método A e as exigências apresentadas pelo caderno de encargos da ex-JAE (1998) [23] corresponderão ao Método B.

Quadro 4.19 – Exigências para a formulação de mastiques betuminosos.

Método	Exigências
A	Relação volumétrica f/b: Equação 3.3. O valor f/b usado corresponde à media dos valores f/b obtidos para um $\Delta T_{ab} = 12^{\circ}C$ e $\Delta T_{ab} = 16^{\circ}C$.
B	Relação f/b em massa: 1,1 – 1,5 ou 1,3 – 1,5 dependendo do tipo de mistura.

De acordo com os intervalos definidos pelo método B, foi escolhido uma relação ponderal de 1,2, que se aproxima dos limites inferiores impostos. A escolha desta relação f/b incidiu na necessidade de comparar o comportamento dos mastiques com diferentes relações f/b. Como já referido na secção 4.3, no que diz respeito à metodologia apresentada pelo método A, para o fíler RC590, adotou-se o mesmo valor do índice de vazios de Rigden que o fíler RC480, visto apresentarem granulometrias muito próximas. Em relação aos valores fornecidos para a Cal-NHL5, foi considerado o valor médio de cada intervalo apresentado no Quadro 4.16. No Quadro 4.20 apresenta-se um resumo das relações f/b usadas na produção dos mástiques.

Quadro 4.20 – Resumo das relações f/b usadas na produção dos mastiques betuminosos.

Método	Fíler					
	RC480		RC590		NHL5	
	f/b (massa)	f/b (volume)	f/b (massa)	f/b (volume)	f/b (massa)	f/b (volume)
A	1,68	0,65	1,70	0,65	1,57	0,58
B	1,20	-	1,20	-	1,20	-

4.6.2. Processo de fabrico dos mastiques betuminosos

Para o fabrico dos mastiques betuminosos foi desenvolvido um processo de fabrico com o objetivo de produzir mastiques em iguais condições. Considerando as características dos fíleres e após a caracterização dos betumes puros e modificados, foi utilizado o seguinte protocolo experimental:

- Definir as quantidades de fíler e betume de modo a que se obtenha amostras com um peso final de 1000g;

- Colocar o fíler numa estufa à temperatura de 165°C com o objetivo de facilitar a mistura do fíler com o betume;
- Colocar o betume na manta de aquecimento e iniciar a agitação com uma rotação de 400RPM até atingir uma temperatura entre 150°C e 165°C;
- Após a homogeneização do betume, adicionar lentamente o fíler para minimizar o aparecimento de bolhas de ar no preparado;
- Manter a agitação a 400RPM até se obter uma mistura homogénea;
- Retirar amostras para a realização dos ensaios de caracterização dos mastiques, descritos em 4.3.

O tempo de fabrico dos mastiques betuminosos variou entre os 30 e 45 minutos, dependendo do tipo de fíler e betume aplicado.

Na Figura 4.10, apresenta-se o equipamento utilizado na produção dos mastiques betuminosos, o termómetro digital usado para controlo da temperatura, a manta de aquecimento, o agitador e o papel de alumínio, que tem como objetivo evitar a dissipação de calor durante a produção.



Figura 4.10 - Manta de aquecimento, misturador e termómetro de controlo da temperatura.

4.7. Análise dos resultados de caracterização dos mastiques betuminosos

Os ensaios de caracterização dos mastiques incluem os ensaios de penetração, temperatura de amolecimento e viscosidade dinâmica, descritos na secção 4.3. Cada subsecção contém um quadro resumo dos valores da penetração e da temperatura de amolecimento de cada mastique assim como a variação destes valores em relação ao betume usado em cada mastique. Os resultados da viscosidade dinâmica são apresentados graficamente, sendo que cada gráfico representa os valores dos três mastiques para cada betume a uma dada temperatura. No anexo C apresentam-se os quadros dos valores da viscosidade dinâmica registados para cada mastique para as diferentes temperaturas e taxas

de corte, as representações gráficas para as temperaturas ensaiadas não apresentadas nesta secção e as equações do modelo da Lei Potência. Em relação ao modelo de Cross, apenas se apresentam-se os parâmetros do modelo.

4.7.1. Método A

4.7.1.1. Penetração e Temperatura de Amolecimento

Quadro 4.21 – Resultados da caracterização dos mastiques betuminosos da classe 35/50 (Método A).

Propriedades	B 35/50			B 35/50 PMB2			B 35/50 PMB4		
	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	21	22	19	21	21	18	16	16	14
ΔPen	21	20	23	22	23	26	23	23	25
T_{ab} (°C)	61,1	62,6	66,6	66	72,7	97,7	101,7	102	126,4
ΔT_{ab} (°C)	9,3	10,8	14,8	9,1	15,8	40,8	31,5	31,8	56,2

Quadro 4.22 – Resultados da caracterização do mastiques betuminosos da classe 50/70 (Método A).

Propriedades	B 50/70			B 50/70 PMB2			B 50/70 PMB4		
	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	34	33	26	28	27	24	27	25	22
ΔPen	29	30	36	25	26	29	16	18	21
T_{ab} (°C)	56,6	57,5	62,2	60,7	62	73,1	84,8	87	90,1
ΔT_{ab} (°C)	8,2	9,1	13,8	3,1	4,4	15,5	6,5	8,7	11,8

4.7.1.2. Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70

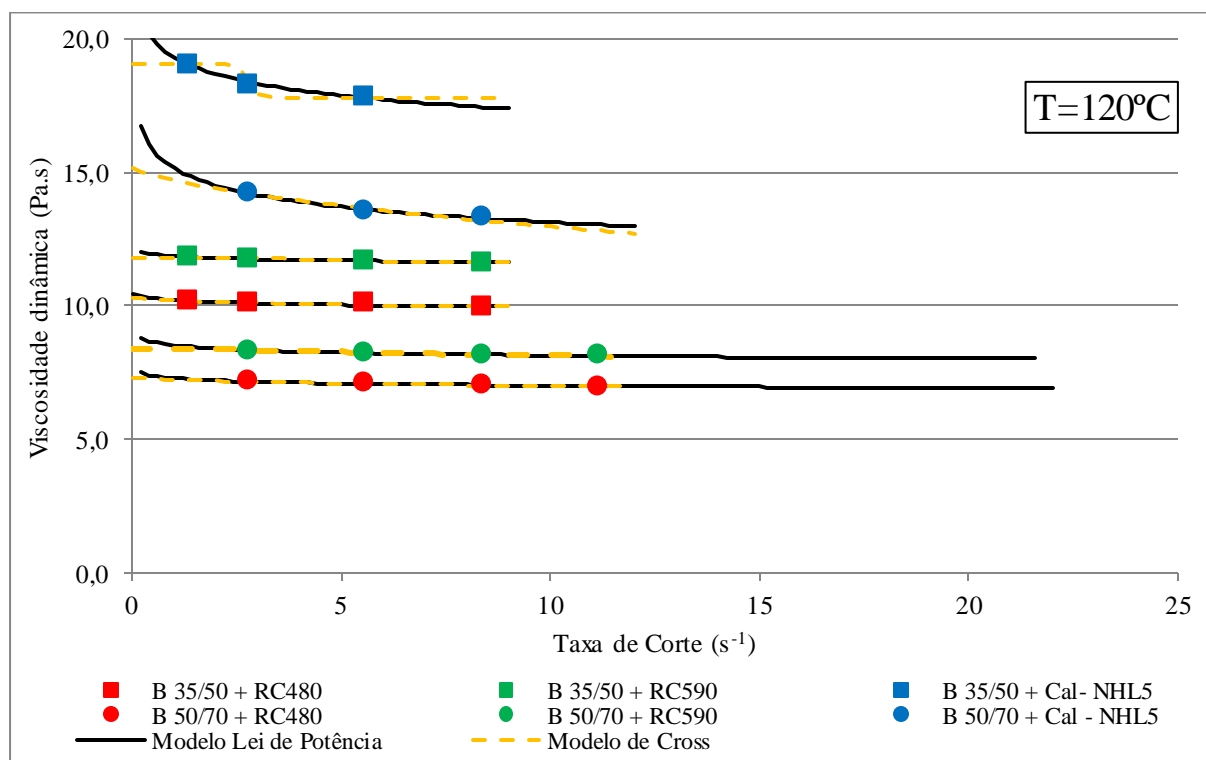


Figura 4.11 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 120°C para várias taxas de corte (Método A).

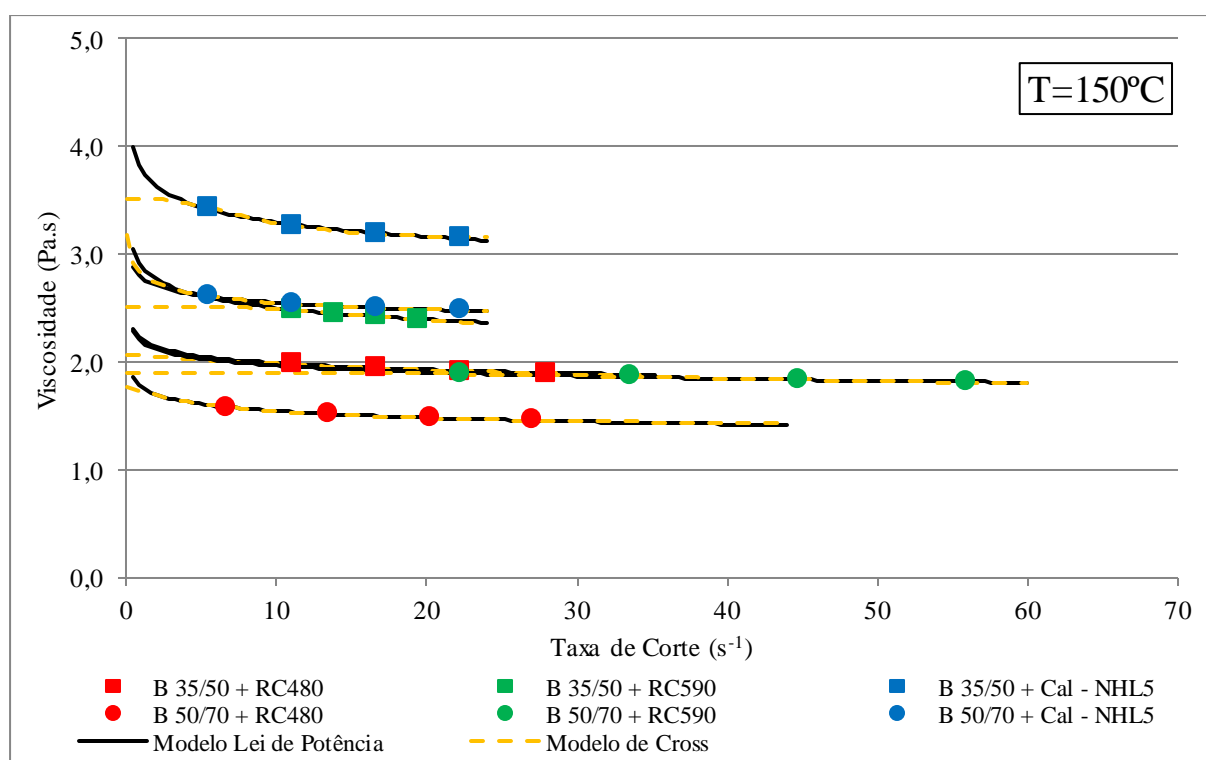


Figura 4.12 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método A).

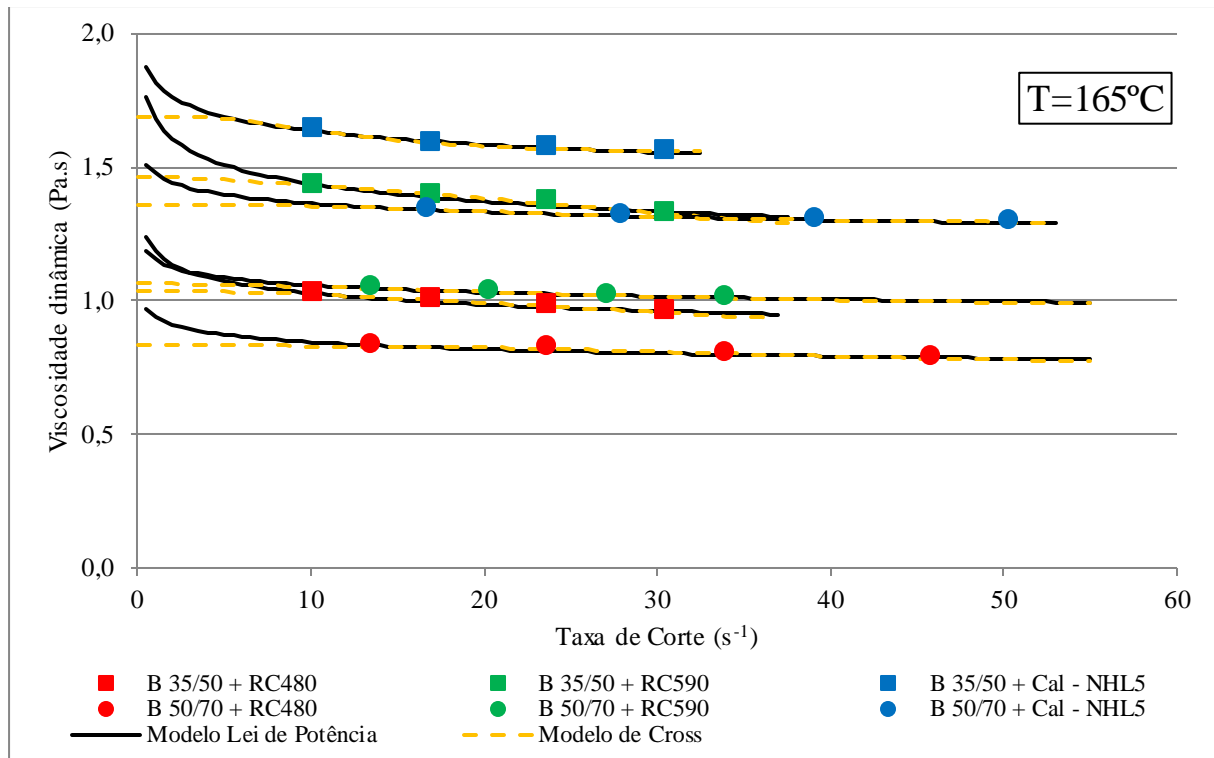


Figura 4.13 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de $165^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método A).

4.7.1.3. Viscosidade dinâmica dos mastiques com betume B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2

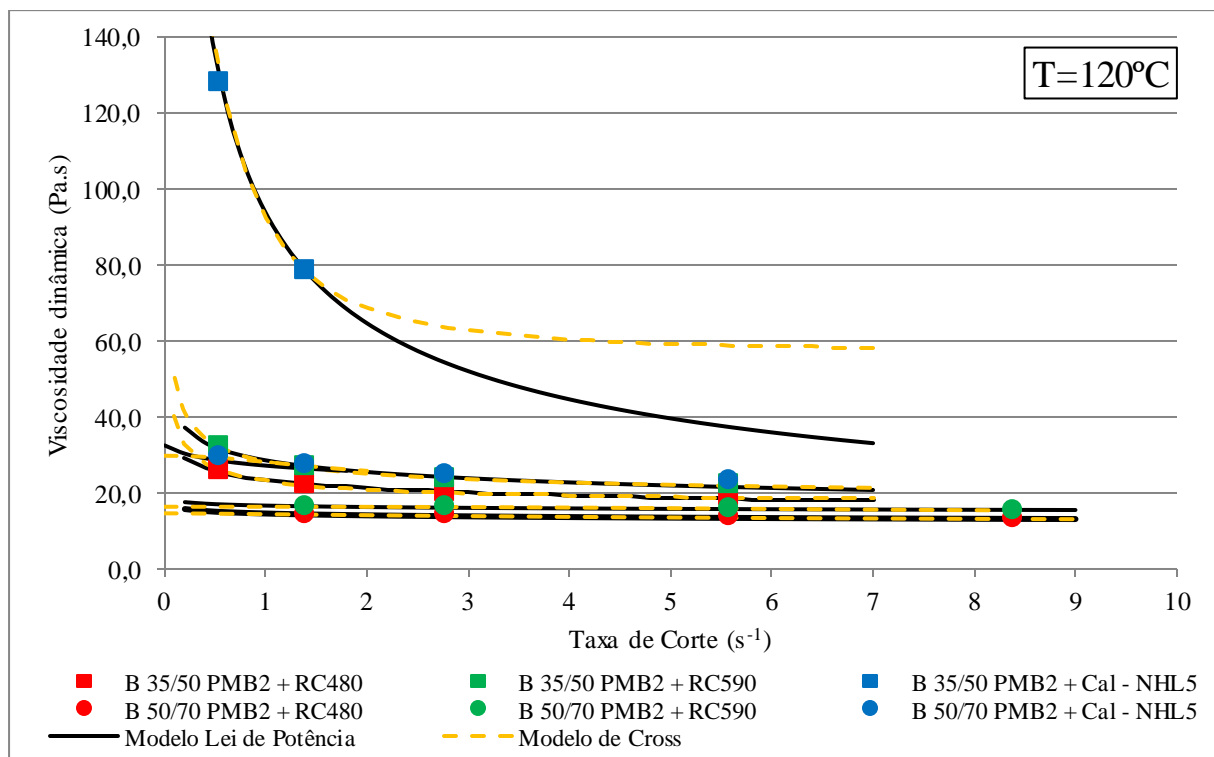


Figura 4.14 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de $120^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método A).

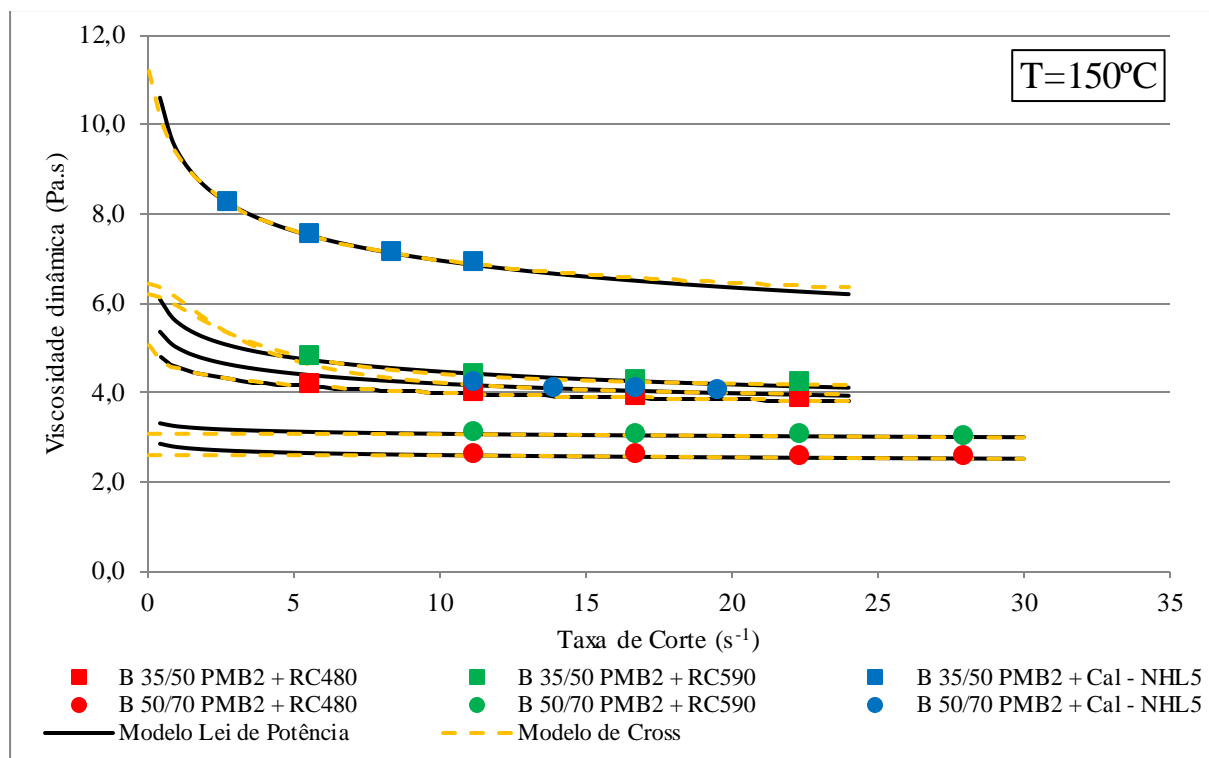


Figura 4.15 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método A).

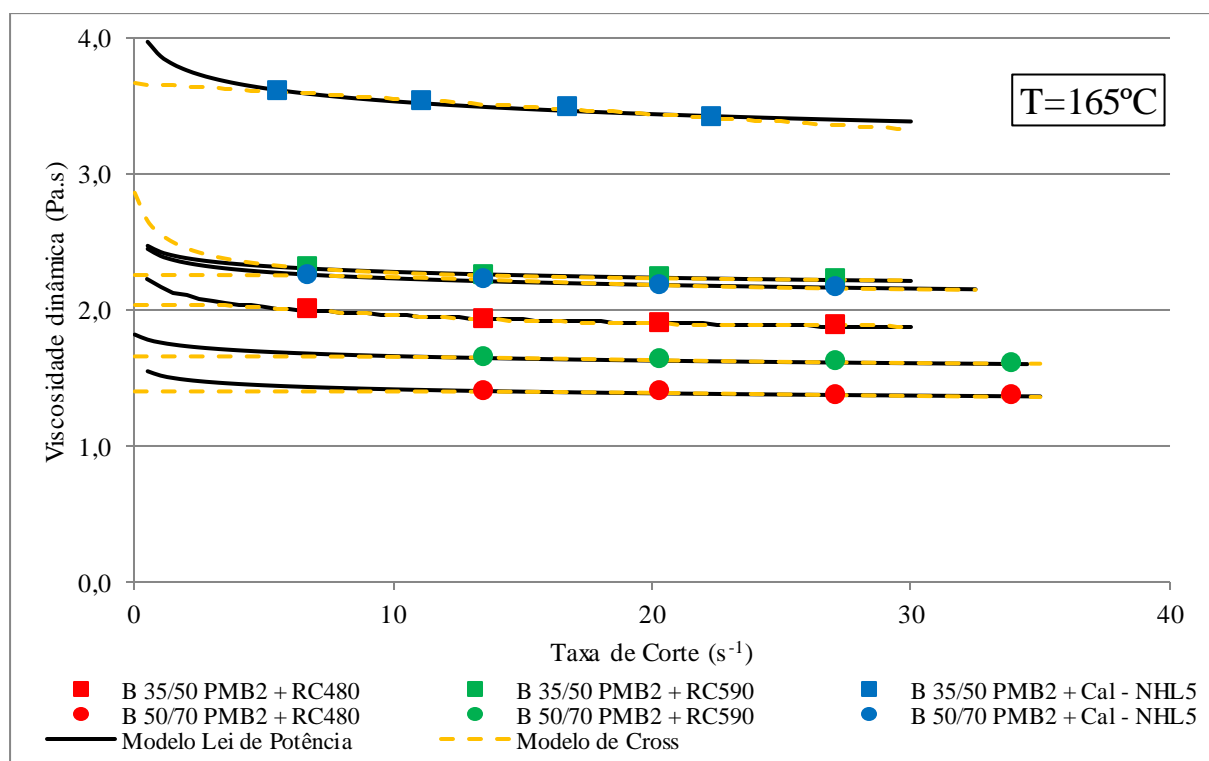


Figura 4.16 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método A).

4.7.1.4. Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4

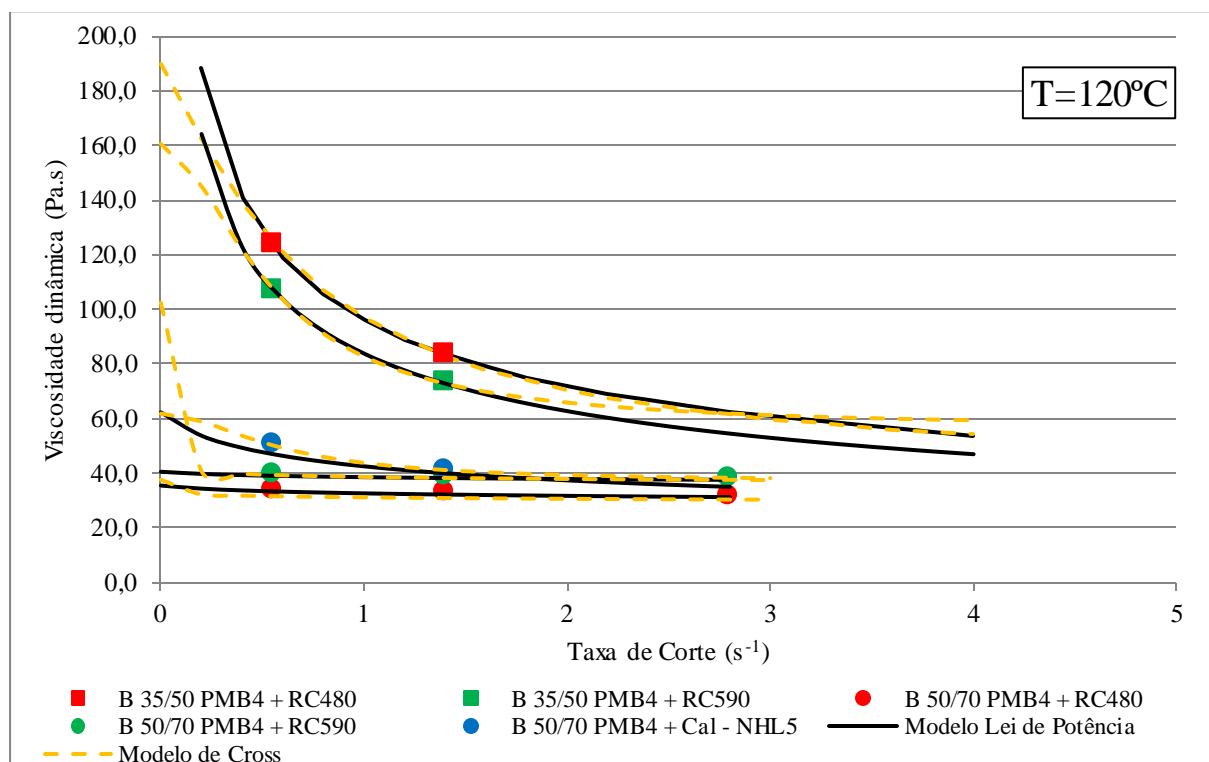


Figura 4.17 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de $120^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método A).

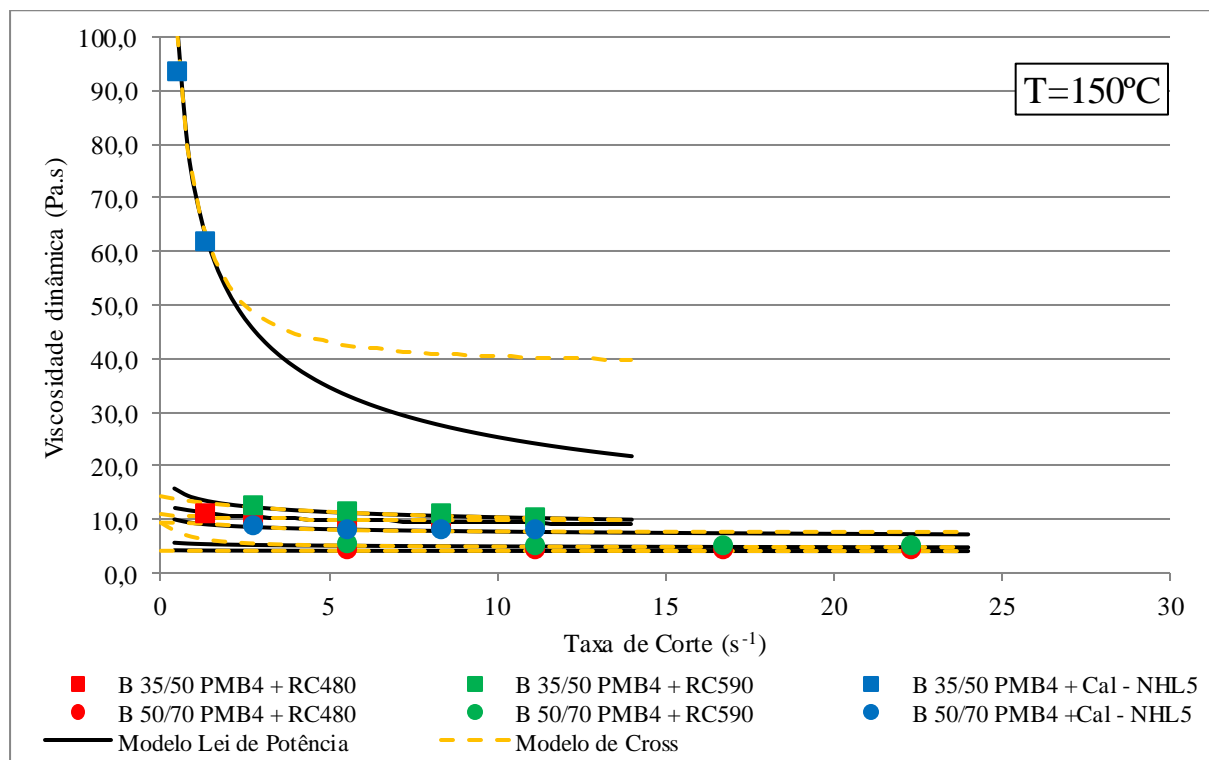


Figura 4.18 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de $150^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método A).

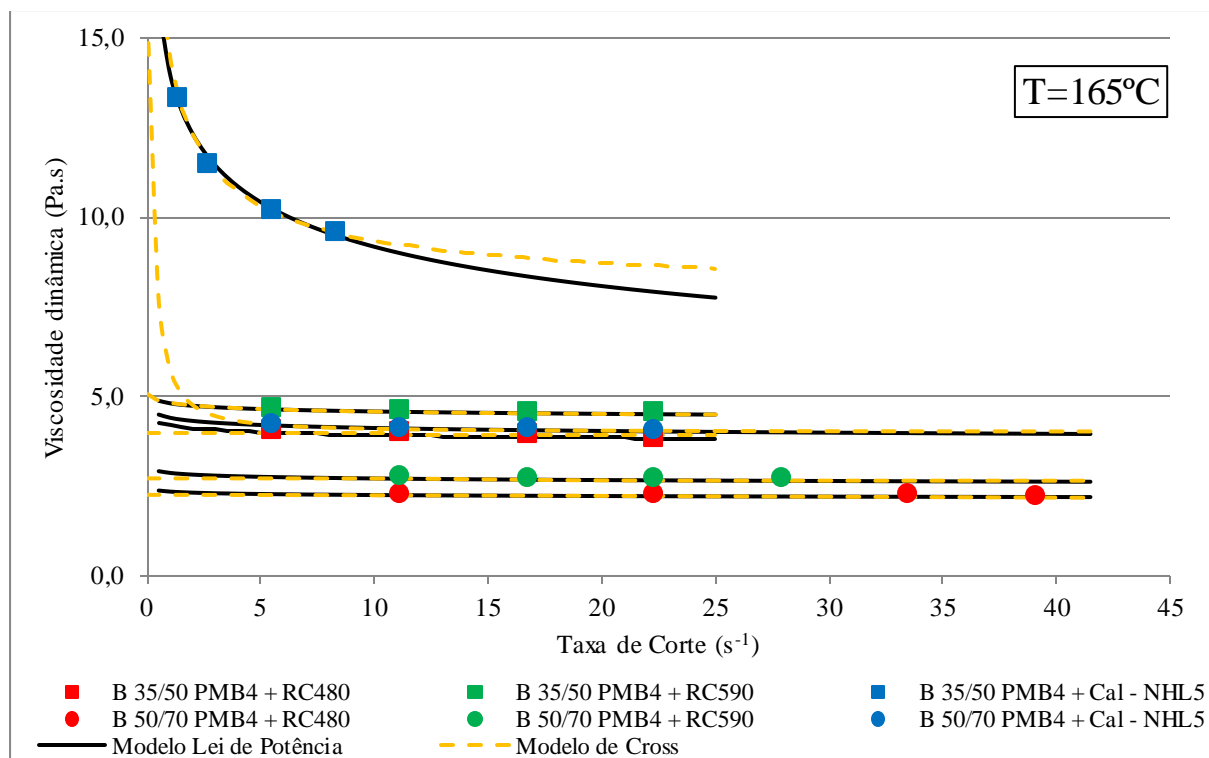


Figura 4.19 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método A).

4.7.2. Método B

4.7.2.1. Penetração e Temperatura de Amolecimento

Quadro 4.23 – Resultados da caracterização do mastiques betuminosos da classe 35/50 (Método B).

Propriedades	35/50 B			B 35/50 PMB2			B 35/50 PMB4		
	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	28	31	22	24	24	20	22	21	18
ΔPen	14	11	20	20	20	23	17	18	21
T_{ab} (°C)	57,9	56,9	61,4	60,4	61,4	71,6	94,6	95,4	94,4
ΔT_{ab} (°C)	6,1	5,1	9,6	3,5	4,5	14,7	24,4	25,2	24,2

Quadro 4.24 – Resultados da caracterização do mastiques betuminosos da classe 50/70 (Método B).

Propriedades	50/70 B			B 50/70 PMB2			B 50/70 PMB4		
	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5	RC480	RC590	NHL5
Penetração (0,1 mm) [25°C, 100g, 5s]	40	40	33	40	40	33	40	40	33
ΔPen	22	23	29	22	23	29	22	23	29
T_{ab} (°C)	52,9	53,6	56,7	52,9	53,6	56,7	52,9	53,6	56,7
ΔT_{ab} (°C)	4,5	5,2	8,3	4,5	5,2	8,3	4,5	5,2	8,3

4.7.2.2. Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70

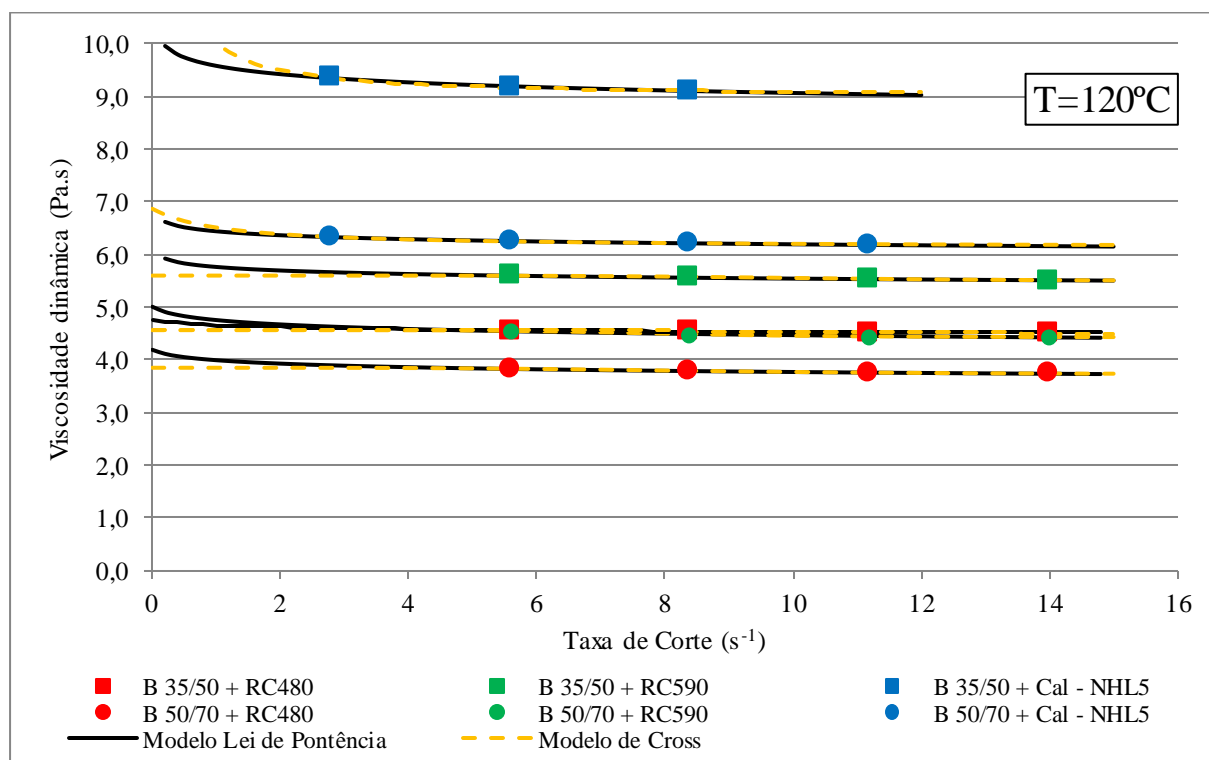


Figura 4.20 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70, a uma temperatura de $120^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

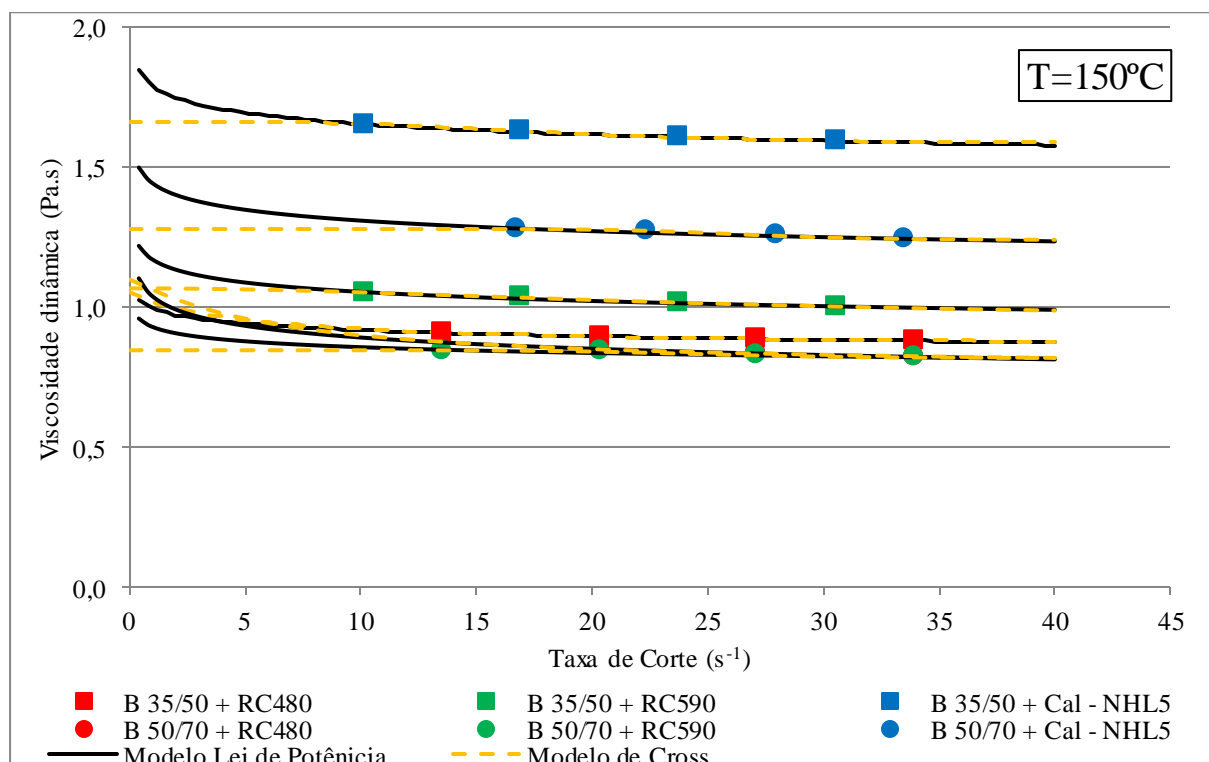


Figura 4.21 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70, a uma temperatura de $150^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

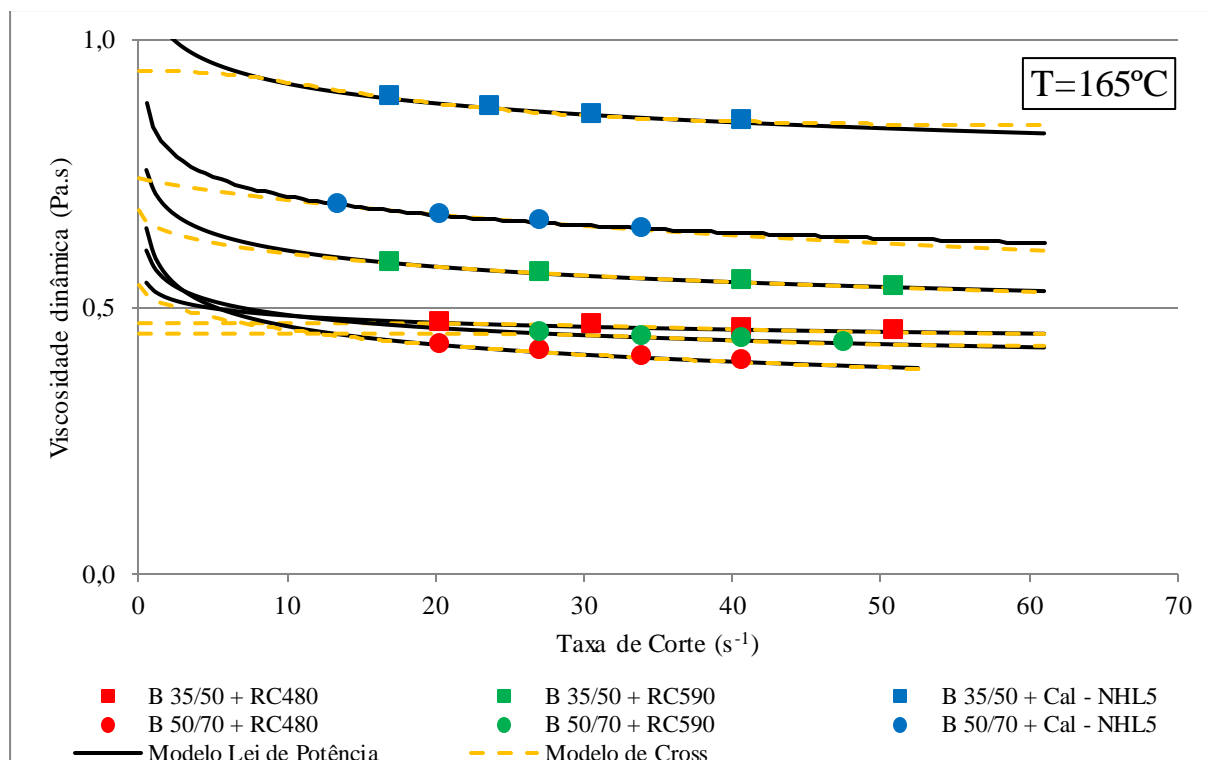


Figura 4.22 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B 50/70, a uma temperatura de $165^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

4.7.2.3. Viscosidade dinâmica dos mastiques com betume B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2

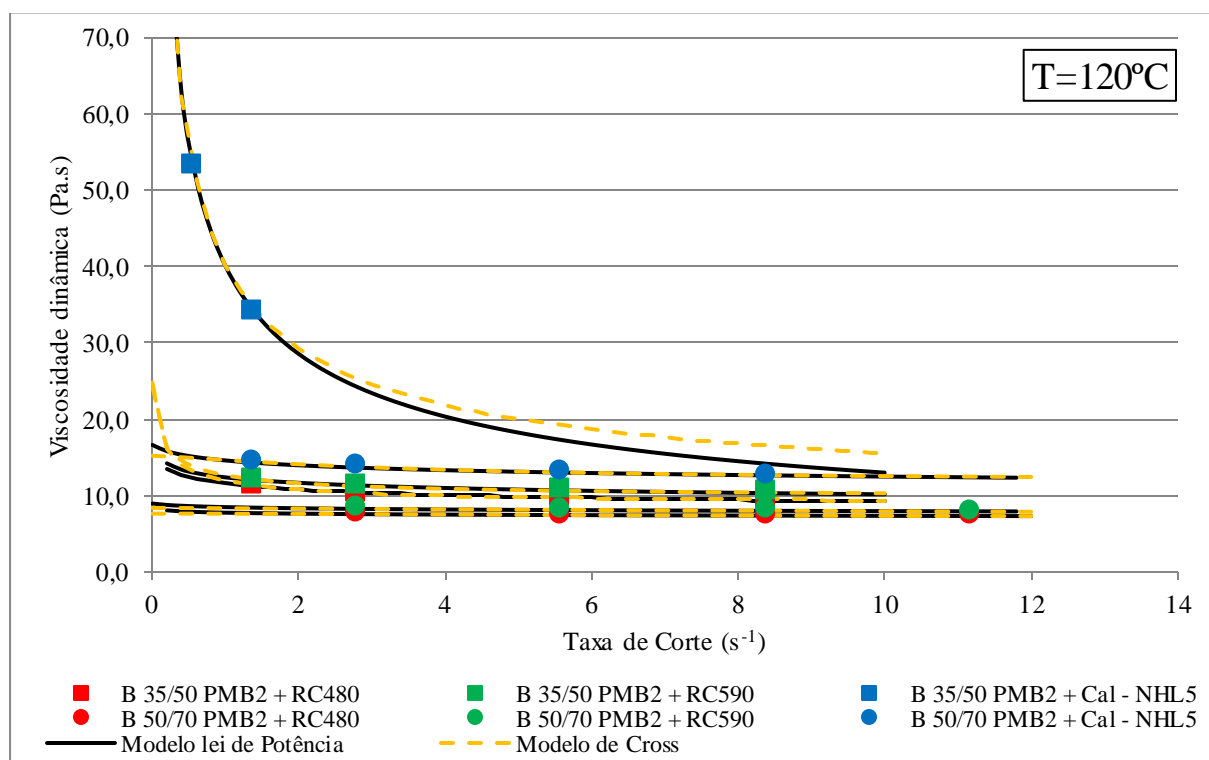


Figura 4.23 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de $120^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

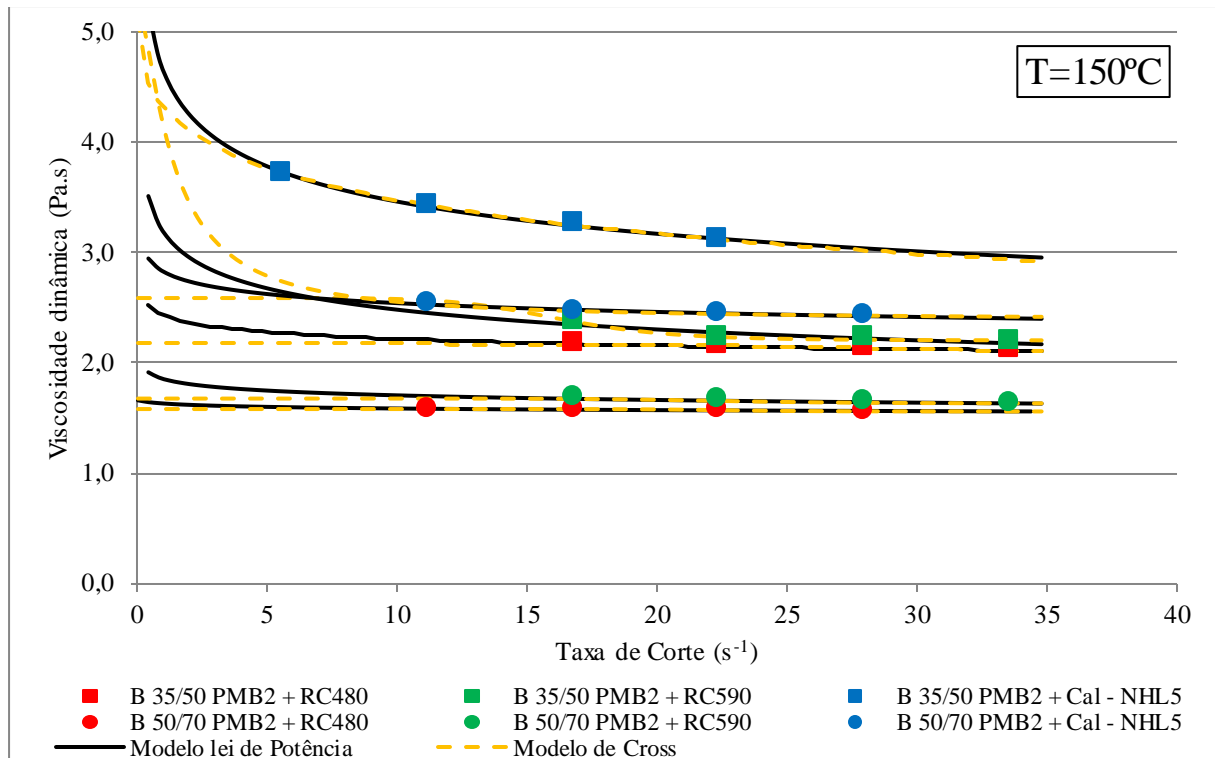


Figura 4.24 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 150°C para várias taxas de corte (Método B).

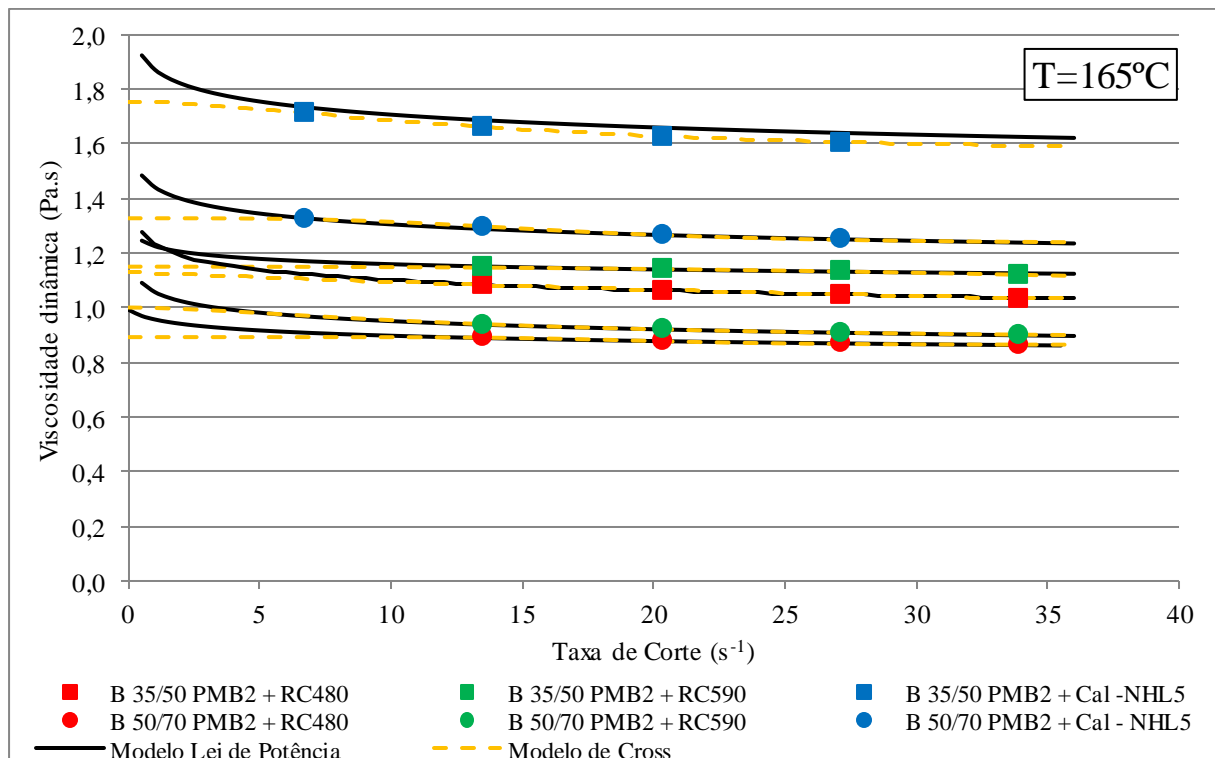


Figura 4.25 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método B).

4.7.2.4. Viscosidade dinâmica dos mastiques com betume B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4

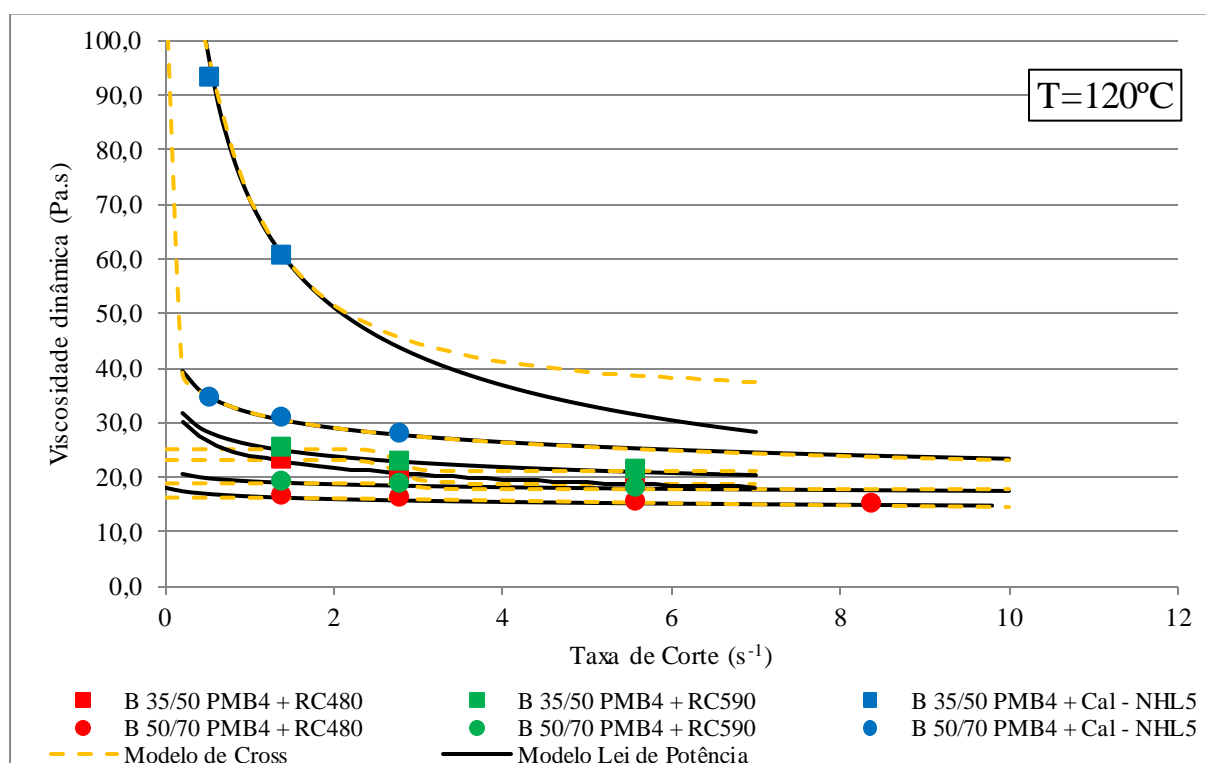


Figura 4.26 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de $120^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

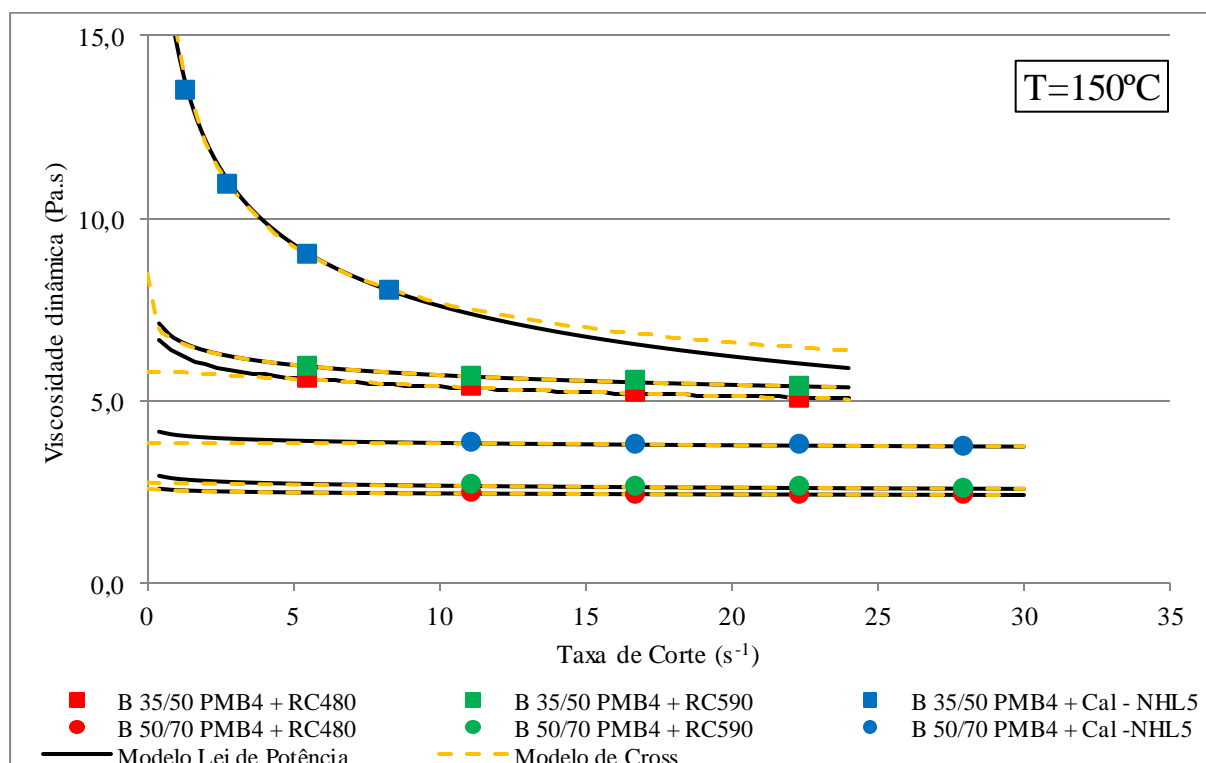


Figura 4.27 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de $150^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

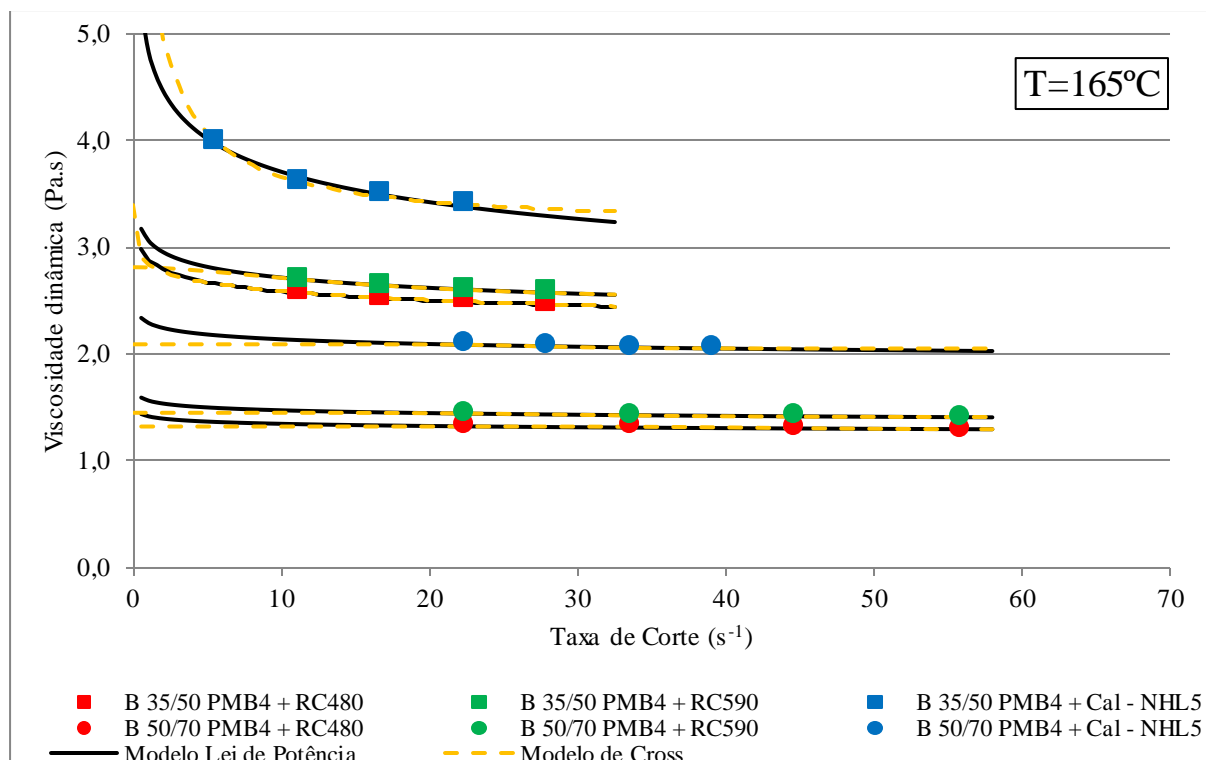


Figura 4.28 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 165°C para várias taxas de corte (Método B).

4.7.2.5. Discussão dos resultados

A partir da observação dos Quadros 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, constata-se que para os mastiques produzidos através do método A, os valores da penetração correspondem a uma redução de cerca de 50% do valor da penetração do betume utilizado em cada mastique.

No quadro 4.25, apresentam-se intervalos em que se inserem os valores da variação das temperaturas de amolecimento dos mastiques fabricados através do método A.

Quadro 4.25 – Valores máximos e mínimos das temperaturas de amolecimento registados nos mastiques.

Filer	Temperatura de amolecimento (°C)	
	Mínimo	Máximo
RC480	3,1	31,5
RC590	4,4	31,8
Cal – NHL5	11,8	56,2

Os valores mínimos para os fileres RC480 e RC590 obtiveram-se nos mastiques constituídos pelo betume B 50/70 PMB2 enquanto que para a Cal – NHL5, o valor mínimo verifica-se para o betume B 50/70 PMB4. Em relação aos valores máximos, para todos os fileres, os valores obtidos verificam-se para o betume B 35/50 PMB4, concluindo-se que nestes betumes existe uma grande interação do filer com o polímero SBS. OS fileres RC480 e RC590, devido às suas semelhanças,

apresentam valores bastante idênticos, ao contrário da Cal-NHL5, que mesmo com uma relação f/b menor que os outros fíleres, exhibe resultados muito superiores aos restantes fíleres.

O fabrico dos mastiques através deste método prevê um incremento da temperatura de amolecimento entre os 12° C e os 16°C, verificando-se apenas quatro mastiques que respeitam esta condição, Quadro 4.26. Os mastiques produzidos com os betumes puros e a Cal-NHL5 respeitam as condições impostas pelo método A, concluindo-se a existência de uma boa relação entre as características dos dois materiais consideradas na Equação (3.3).

Quadro 4.26 – Mastiques que respeitam os requisitos impostos pelo método A.

Mastiques		ΔT_{ab} (°C)
Betume	Fíler	
B 35/50	Cal-NHL5	14,8
B 35/50 PMB2	RC590	15,8
B 50/70	Cal-NHL5	13,8
B 50/70 PMB2	Cal-NHL5	15,5

No que diz respeito aos mastiques produzidos tendo como base o método B, verifica-se uma redução da penetração entre os 20% e os 50% em relação aos betumes base.

Relativamente à temperatura de amolecimento conclui-se que a variação da temperatura de amolecimento não é muito sensível à variação do fíler para o mesmo betume, mas deteta variações do tipo de betume no mastique. Apenas nos mastiques que contêm o betume B 35/50 PMB2 se verifica uma diferença significativa dos valores para os vários fíleres.

Da análise dos gráficos das viscosidades versus taxa de corte verifica-se que todos os mastiques demonstram um comportamento reológico não-newtoniano do tipo *shear-thinnig*, sendo mais acentuado para as temperaturas inferiores. A sedimentação do fíler durante os ensaios de medição da viscosidade dinâmica dos mastiques tem grande efeito no comportamento reológico dos mastiques, principalmente na fase inicial dos ensaios devido à rotação inicial dada à haste, necessária movimentar as partículas de fíler em suspensão no betume. Observa-se também que as diferenças entre as viscosidades dos diferentes mastiques, são proporcionais à variação da temperatura.

Em geral, os mastiques que contêm Cal-NHL5 apresentam viscosidades bastantes superiores em comparação com os mastiques fabricados com fíleres calcários. Verifica-se que o comportamento destes mastiques varia de forma diferente em cada classe de betume. Para a classe 35/50, os mastiques com Cal-NHL5 têm viscosidades superiores aos da classe 50/70, apresentando curvas mais acentuadas. Visto que o fíler RC590 é ligeiramente mais fino que o fíler RC480, não há grande diferença entre as viscosidades medidas, embora se tenha obtido viscosidades superiores na maioria dos mastiques com RC590. Em ambas as classes de betumes estes fíleres exibem comportamentos similares.

Os mastiques constituídos pelos betumes puros e modificado da classe 35/50 exibem maiores viscosidades em comparação com os betumes da classe 50/70. Estes valores de viscosidade, bastante elevados, devem-se ao facto de o filler ter uma grande interação com as partículas do polímero, devido à dificuldade do polímero se dissolver no betume em comparação com os betumes da classe 50/70.

O filler que mais interage com os betumes e com a percentagem de SBS nos betumes modificados é a Cal-NHL5, exibindo viscosidades bastante elevadas em comparação com os outros dois fillers.

Comparando os dois métodos utilizados, obteve-se maiores viscosidades para os mastiques produzidos com o método A visto que a relação ponderal f/b é superior. Pela análise dos gráficos e das equações do modelo de Cross e Lei de Potência, constata-se que para a segunda formulação usada, o comportamento entre mastiques é bastante semelhante. Nos mastiques com betumes puros, verifica-se que para as duas classes de betume os mastiques apresentam comportamentos semelhantes, variando apenas o valor da viscosidade, sendo inferior para os betumes da classe 50/70.

Para que a análise da interação filler-betume seja mais aprofundada, é necessário compreender o comportamento dos mastiques com o aumento da temperatura e para as várias concentrações de polímero SBS usadas. As Figuras 4.29 a 4.36 representam a relação entre a viscosidade dos mastiques e a concentração do polímero SBS, a uma dada temperatura e taxa de corte, para cada gama de betume e formulação. Escolheram-se duas temperaturas intermédias, 120 e 165°C, e uma taxa de corte, 6,8 s⁻¹. As viscosidades apresentadas foram calculadas através das equações geradas para o modelo de Cross.

Como era esperado, nas duas classes de betumes estudadas verifica-se um aumento significativo das viscosidades dos mastiques com o aumento da concentração do polímero SBS no betume. Observa-se que todos os fillers apresentam igual tendência, ou seja, quanto maior é a percentagem de filler adicionada ao betume base, maior será a diferença de viscosidades entre cada mastique.

Classe 35/50 – Método A

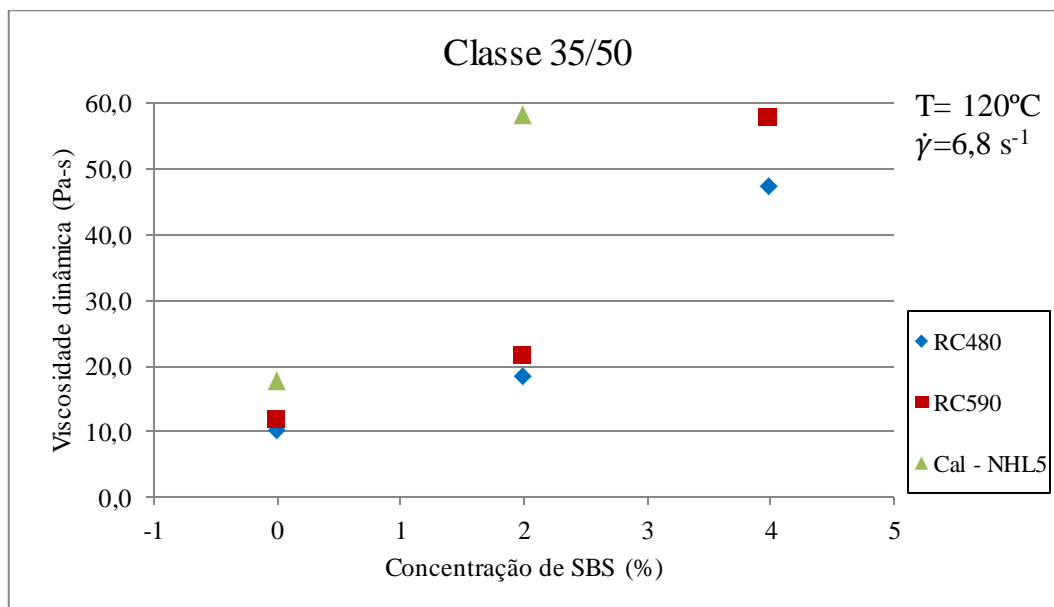


Figura 4.29 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para T= 120°C e $\dot{\gamma}=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).

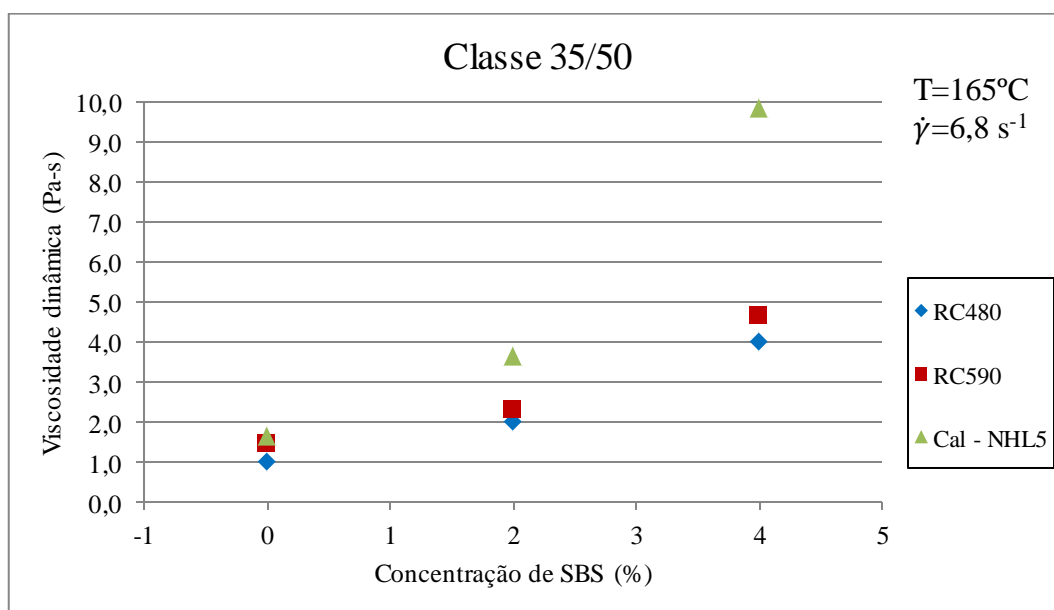


Figura 4.30 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para T= 165°C e $\dot{\gamma}=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).

Classe 35/50 – Método B

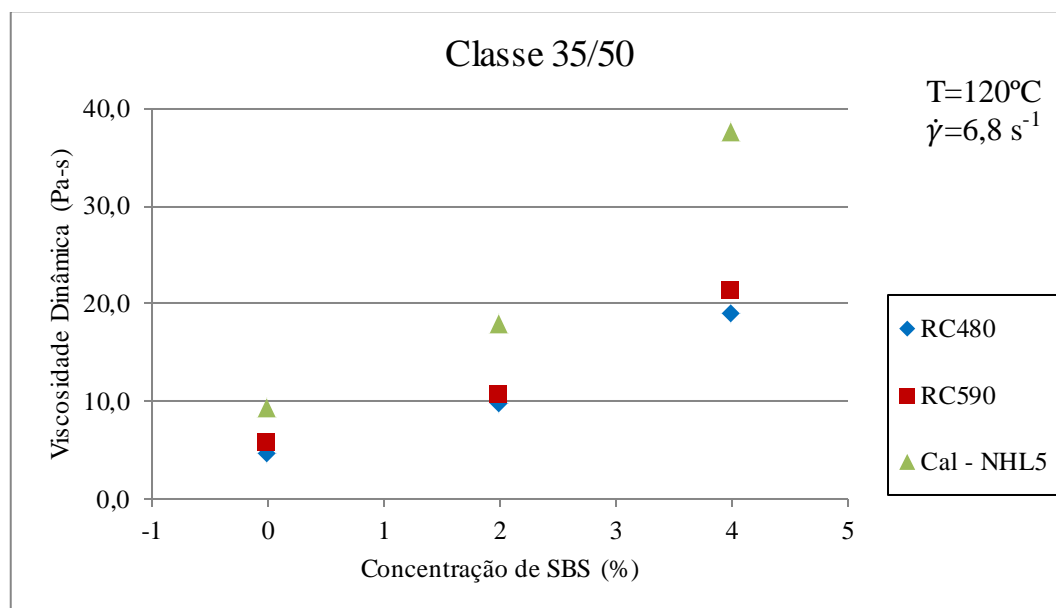


Figura 4.31 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para $T=120^{\circ}\text{C}$ e $\dot{\gamma}=6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).

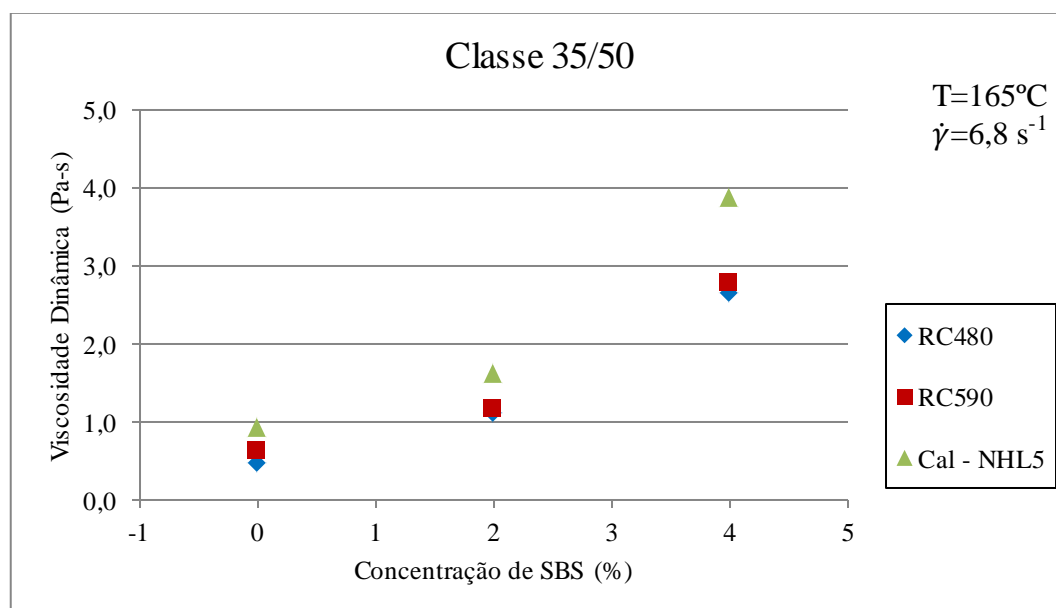


Figura 4.32 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 35/50, para $T=165^{\circ}\text{C}$ e $\dot{\gamma}=6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).

Para os mastiques da classe 35/50 produzidos tendo como base a formulação proposta pelo método A, Figura 4.29 e 4.30, constata-se que os mastiques compostos pelos fíleres RC480 e RC590 apresentam comportamentos bastante semelhantes. Como já anteriormente referido, os mastiques com o RC590 exibem viscosidades ligeiramente superiores, visto ser ligeiramente mais fino que o RC480.

No que diz respeito à Cal-NHL5, verificam-se viscosidades bastantes superiores em comparação com os restantes fileres, indicando que as viscosidades medidas para os mastiques da classe 35/50 sejam mais dependentes da percentagem de polímero presente no betume.

É possível ainda observar que, com o aumento de temperatura, a interação do filer, independentemente da sua origem, com o polímero tende a diminuir, resultando uma aproximação das viscosidades dos vários mastiques.

No que diz respeito aos mastiques que correspondem à formulação apresentada para método B, Figura 4.31 e 4.32, verifica-se que com o aumento a temperatura, o comportamento dos mastiques com o aumento da concentração de SBS no betume tende a ser constante, ou seja, a diminuição das viscosidades dos mastiques é proporcional para todos os fileres.

Com este método continua-se ainda a observar uma grande interação dos fileres com o betume B 35/50 PMB4, concluindo-se que o aumento da percentagem de polímero adicionado ao betume B 35/50 irá produzir viscosidades bastante superiores para os mastiques, evidenciando cada vez mais a sua dependência da concentração de SBS.

Classe 50/70 – Método A

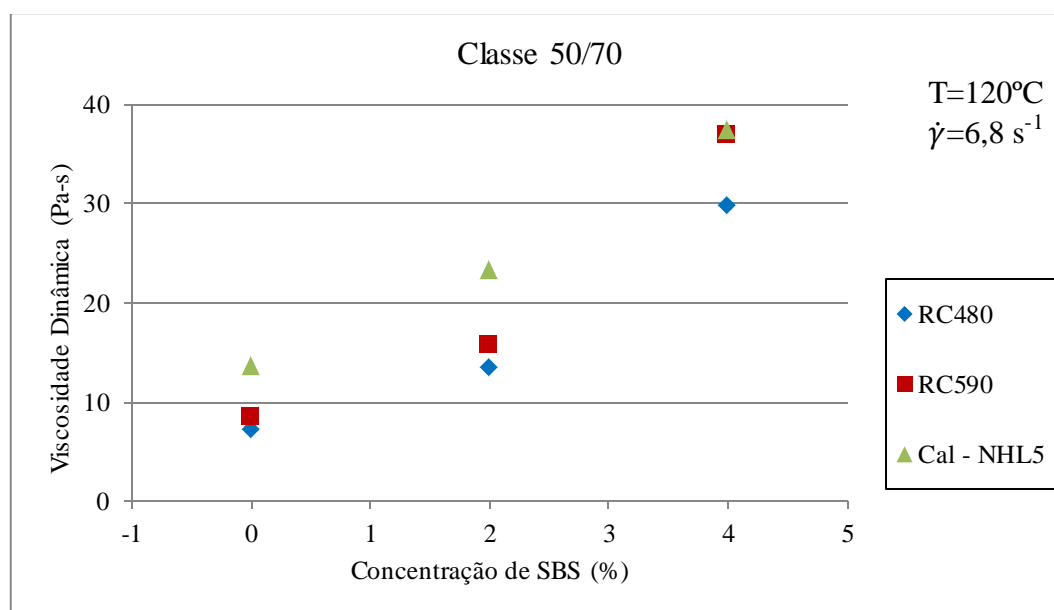


Figura 4.33 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para T= 120°C e $\dot{\gamma}=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).

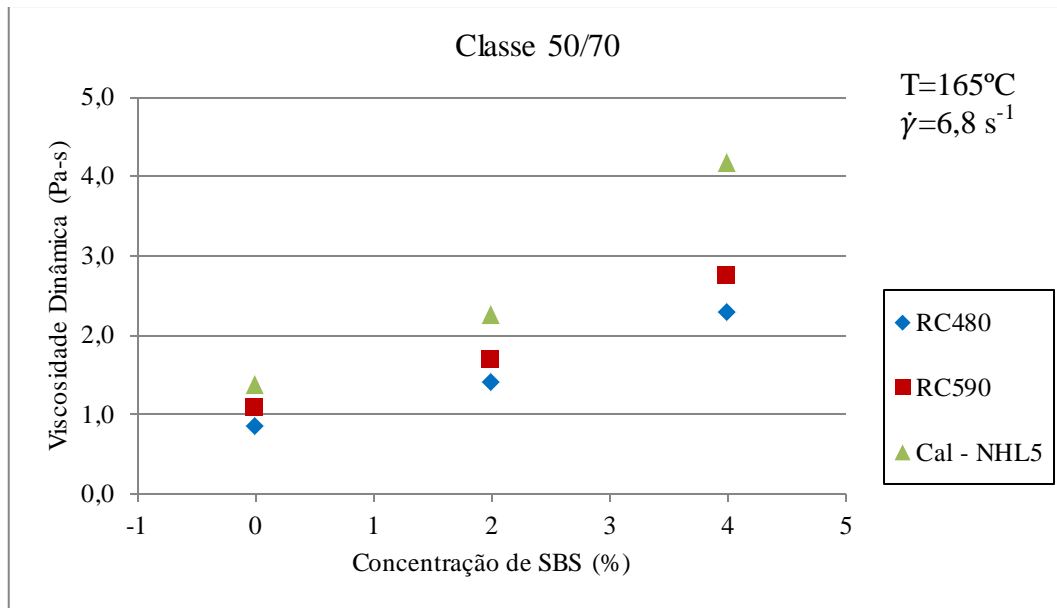


Figura 4.34 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para $T=165^{\circ}\text{C}$ e $\dot{\gamma}=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).

Classe 50/70 – Método B

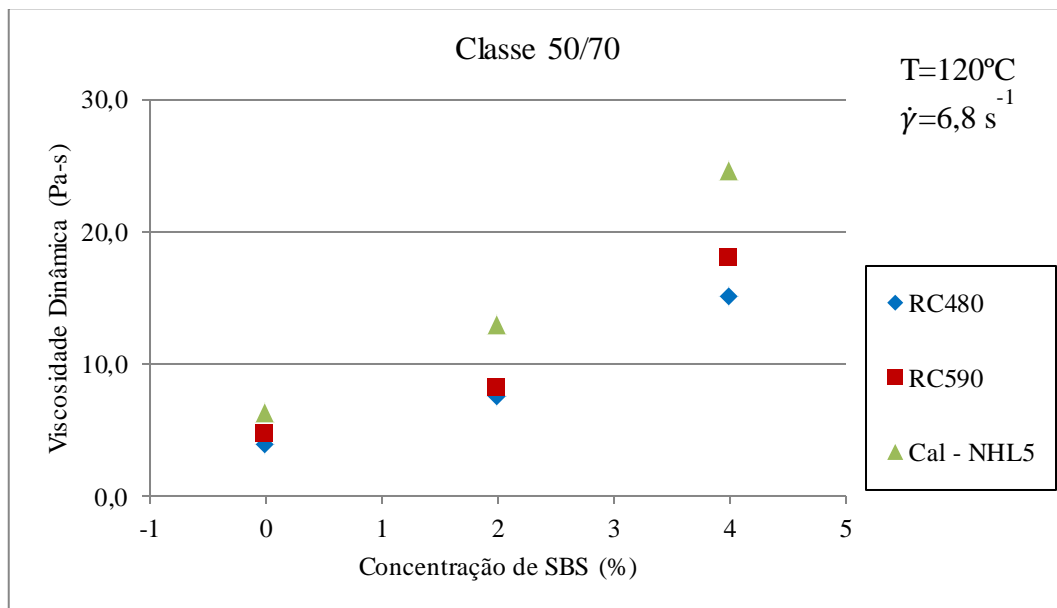


Figura 4. 35 - Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para $T=120^{\circ}\text{C}$ e $\dot{\gamma}=6.8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).

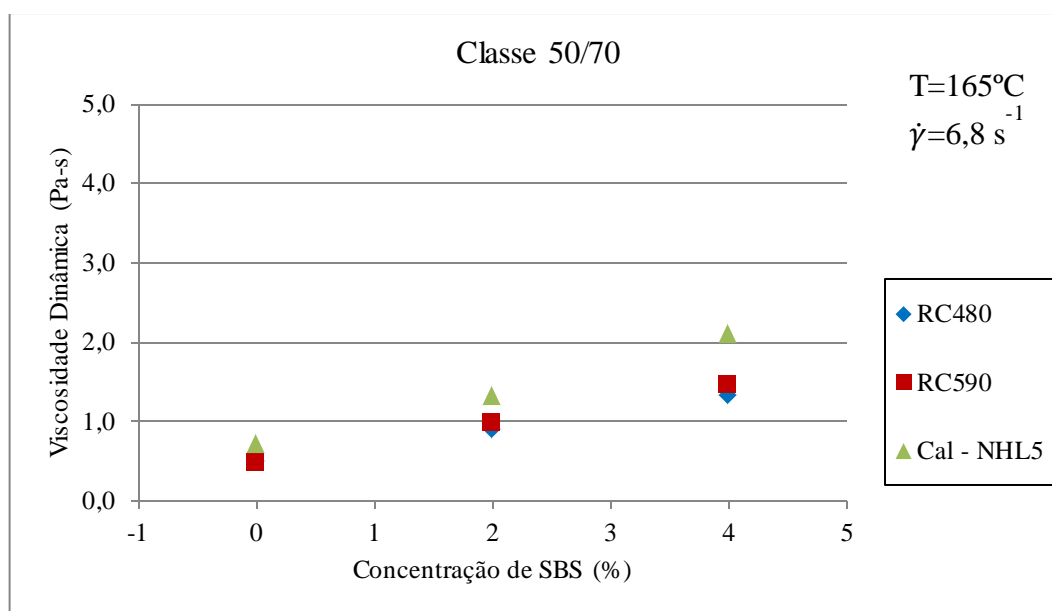


Figura 4.36 – Relação entre a concentração de SBS e a viscosidade dinâmica dos mastiques da classe 50/70, para $T=165^{\circ}\text{C}$ e $\dot{\gamma}=6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).

As Figuras 4.33 e 4.34 correspondem ao comportamento dos mastiques pertencentes à classe 50/70 formulados com o método A. Em relação aos fileres RC480 e RC590 observa-se um comportamento semelhante nos mastiques da classe 35/50.

Constata-se que a baixas temperaturas, a Cal-NHL5 apresenta um aumento linear da viscosidade com o aumento da concentração de SBS, embora o valor registado para o mastique com o betume B50/70PMB4 seja muito próximo do valor registado para o filer RC590, visto que as viscosidade obtidas para os mastiques são provenientes das equações geradas pelo modelo de Cross.

Em relação aos mastiques que correspondem ao método B, Figura 4.35 e 4.36, verifica-se que para os 120°C , o comportamento do mastique constituído pela Cal-NHL5 e o betume B50/70PMB4 difere do comportamento registado com o método A, com a viscosidade a adotar valores próximos dos reais.

Os mastiques constituído pelos fileres RC480 e RC590, em comparação com método A, continuam a apresentar valores bastante semelhantes, embora se verifique uma maior diferença entre as viscosidades para uma concentração de SBS de 4%.

Com o aumento da temperatura nota-se um aumento linear das viscosidades com o incremento da percentagem de polímero, concluindo-se que para os betumes da classe 50/70 não ocorre grande interação do polímero SBS com os fileres.

Em ambos os métodos de formulação, verifica-se uma relação linear entre as viscosidades dos mastiques e a percentagem de polímero com o aumento da temperatura.

Em suma, observa-se que existe uma maior interação filer-betume para os betumes da classe 35/50 em comparação com os betumes da classe 50/70. Constata-se que, em todos os casos, a Cal-NHL5, é a que apresenta uma maior interação com o aumento da concentração de SBS. Verifica-se

que os mastiques constituídos pelo fileres RC480 e RC590 exibem comportamentos semelhantes devido, sobretudo, à semelhança das suas características. As diferenças entre estes dois fileres evidenciam-se com o aumento da percentagem de SBS, com as viscosidades dos mastiques com RC590 a aumentarem em relação aos mastiques com RC480.

5. Temperaturas de fabrico e compactação

5.1. Introdução

Neste capítulo são expostos os resultados referentes às temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados determinadas através da aplicação das metodologias mencionadas na secção 3.2 e os resultados da variação da temperatura resultante da adição do filler aos betumes.

Na secção 5.2 apresentam-se as temperaturas de fabrico e compactação dos vários betumes determinadas através dos vários métodos. As temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros são determinadas recorrendo ao método Superpave. Relativamente aos betumes modificados, aplica-se o método HSRV-E e o método ZSRV-S.

Na secção 5.3 exibem-se os resultados da variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques, resultantes da adição do filler aos betumes puros e modificados, com a aplicação dos vários métodos.

5.2. Betumes puros e modificados

Seguidamente apresentam-se os resultados das temperaturas de fabrico e compactação determinadas através da aplicação das várias metodologias apresentadas na secção 3.2. Na Figura 5.1, apresenta-se a título de exemplo o gráfico que determina as temperaturas de fabrico e compactação do betume B 35/50 através da aplicação do método Superpave. No Anexo D, são apresentadas as equações dos betumes puros e modificados resultantes da aplicação dos vários métodos.

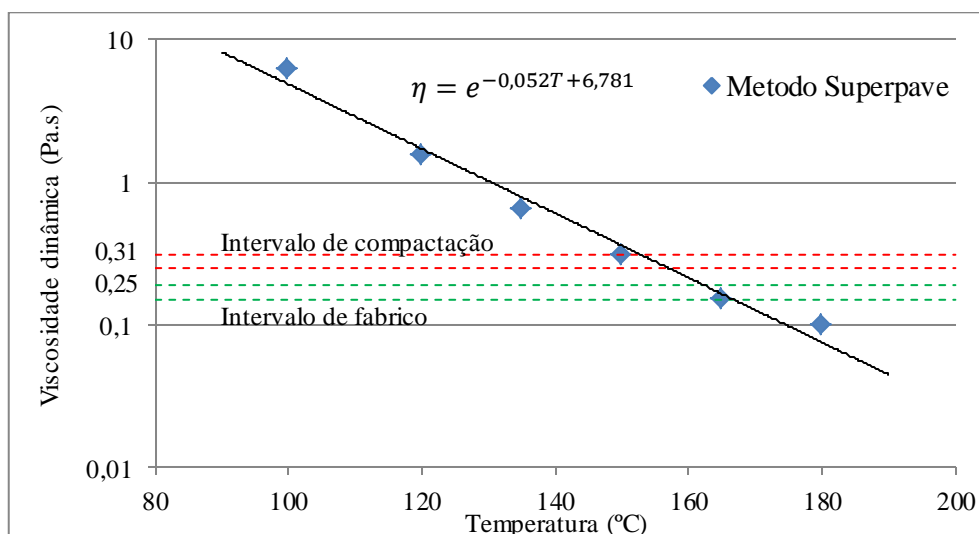


Figura 5.1 – Determinação da temperatura de fabrico e compactação do betume B 35/50.

No Quadro 5.1 apresentam-se os resultados das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados resultantes da aplicação do método Superpave.

Quadro 5.1 – Temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados, de acordo com o método Superpave.

Betumes	Temperaturas (°C)	
	Fabrico	Compactação
B 35/50	164,6	155,0
B 35/50 PMB2	184,1	172,3
B 35/50 PMB4	201,3	188,9
B 50/70	159,2	149,3
B 50/70 PMB2	180,7	170,4
B 50/70 PMB4	198,8	187,4

No Quadro 5.2, apresenta-se a variação das temperaturas de serviço dos vários PMB's em comparação com os betumes puros.

Quadro 5.2 – Variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros.

Betume	Variação de temperatura (°C)	
	Fabrico	Compactação
B 35/50 PMB 2	19,5	17,3
B 35/50 PMB 4	36,6	33,8
B 50/70 PMB 2	21,5	21,1
B 50/70 PMB 4	39,5	38,1

Constata-se que a adição de polímero ao betume puro resulta em uma variação de temperatura entre 17°C e 36°C para os betumes da classe 35/50 e entre 21°C e 40°C para os betumes da classe 50/70, sendo que, para ambas as classes, a variação de temperatura para diferentes percentagens de SBS ronda os 20°C.

Com aplicação do método HSRV-E, em que as temperaturas são calculadas para uma taxa de corte 500 s^{-1} , obtiveram-se as seguintes temperaturas de fabrico e compactação apresentadas no Quadro 5.3. É de salientar que este método não é aplicado à determinação das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros.

Quadro 5.3 – Temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados, de acordo com o método HSRV-E.

Betumes	Temperaturas (°C)	
	Fabrico	Compactação
B 35/50	-	-
B 35/50 PMB2	172	156
B 35/50 PMB4	189	171
B 50/70	-	-
B 50/70 PMB2	168	154
B 50/70 PMB4	186	171

Conforme apresentado no Quadro 5.4, as diferenças de temperatura dos betumes modificados em relação à temperatura dos betumes puros obtida pelo método Superpave diminuem.

Quadro 5.4 – Variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros (HSRV-E).

Betume	Variação de temperatura (°C)	
	Fabrico	Compactação
B 35/50 PMB 2	7	1
B 35/50 PMB 4	24	16
B 50/70 PMB 2	9	5
B 50/70 PMB 4	27	22

Constata-se que com a adição de polímero ao betume puro, resulta uma variação das temperaturas de fabrico e compactação entre 1°C e 24°C para os betumes da classe 35/50 e para os betumes da classe 50/70 entre 5°C e 27°C. Em ambas as classes a variação de temperatura entre cada percentagem de SBS em relação às temperaturas dos betumes puros aumenta significativamente com a quantidade de polímero.

No Quadro 5.5, apresentam-se as temperaturas obtidas para os betumes puros e modificados com a aplicação do método ZSRV-S. Relembra-se que, tal como o método anterior, este método não é aplicado à determinação das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros. As temperaturas apresentadas para estes betumes no Quadro 5.5, servem apenas para estimar o efeito da concentração do polímero SBS na variação das temperaturas de fabrico e compactação.

Quadro 5.5 – Temperaturas de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados, de acordo com o método ZSRV-S.

Betumes	Temperaturas (°C)	
	Fabrico	Compactação
B 35/50	-	-
B 35/50 PMB2	148	140
B 35/50 PMB4	164	155
B 50/70	-	-
B 50/70 PMB2	150	142
B 50/70 PMB4	165	157

A variação de temperatura dos PMB's em relação aos betumes puros calculada através do método em análise, estão representadas no Quadro 5.6.

Quadro 5.6 - Variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros (ZSRV-S).

Betume	Variação de temperatura (°C)	
	Fabrico	Compactação
B 35/50 PMB 2	-17	-15
B 35/50 PMB 4	-1	0
B 50/70 PMB 2	-9	-7
B 50/70 PMB 4	6	8

É de notar que, com este método, as temperaturas de fabrico e compactação são bastante baixas em ambas as classes. Para a classe 35/50 obteve-se variações nas temperaturas de fabrico e compactação entre -17°C e 0°C e para a classe 50/70, os valores variam entre -9°C e 8°C. Verifica-se que, tal como o método HSRV-E, em ambas as classes a variação de temperatura entre cada percentagem de SBS em relação às temperaturas dos betumes puros aumenta significativamente com a quantidade de polímero.

5.2.1. Discussão dos resultados

No quadro 5.7, apresentam-se um resumo dos limites das temperaturas de fabrico e compactação aconselhados pelos produtores nos certificados dos betumes puros e modificados, apresentadas no Anexo F.

Quadro 5.7 – Temperaturas de fabrico e compactação recomendadas pelo produtor.

Temperaturas	Betume puro		Betume modificado	
	35/50	50/70	35/50	50/70
Fabrico (°C)	150 – 160		160 – 175	155 – 170
Compactação (°C)	140 – 150		155 – 165	150 – 160

Verifica-se que, através do método Superpave, o betume puro B 35/50 apresenta valores ligeiramente superiores aos recomendados pelos produtores, cerca de 5°C para ambas as temperaturas, enquanto os valores referentes ao betume puro B 50/70 se encontram dentro dos intervalos recomendados. Em relação às temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados obtidas através do método Superpave, constata-se, como era de esperar, temperaturas bastantes superiores às aconselhadas pelos produtores.

Pelo método HSRV-E para os betumes modificados, em ambas as classes de betumes, apenas se obteve resultados que cumprem os intervalos aconselhados pelos produtores para os betumes modificados do tipo PMB2.

Em relação ao método da ZSRV-S, verifica-se que para ambas as classes os betumes modificados do tipo PMB4 são os únicos que se inserem nos intervalos recomendados pelos produtores. É de salientar que em ambas as classes, através deste método, as temperaturas de fabrico e compactação dos betumes PMB2 são relativamente baixas às temperaturas sugeridas pelos produtores, sendo as temperaturas da classe 50/70 ligeiramente superiores às da classe 35/50. Esta situação deve-se ao facto de o betume B 50/70 ter reagido mais com a adição do SBS.

5.3. Mastiques betuminosos

Com o objetivo de avaliar a influência do fíler nas temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas criou-se um modelo que permite relacionar as viscosidades de cada mastique com as viscosidades dos betumes e respetivas temperaturas de fabrico e compactação.

Na Figura 5.2, representa-se graficamente o método desenvolvido para a determinação da influência do tipo de fíler na temperatura de fabrico e compactação das misturas betuminosas, considerando as três metodologias de determinação das temperaturas dos betumes.

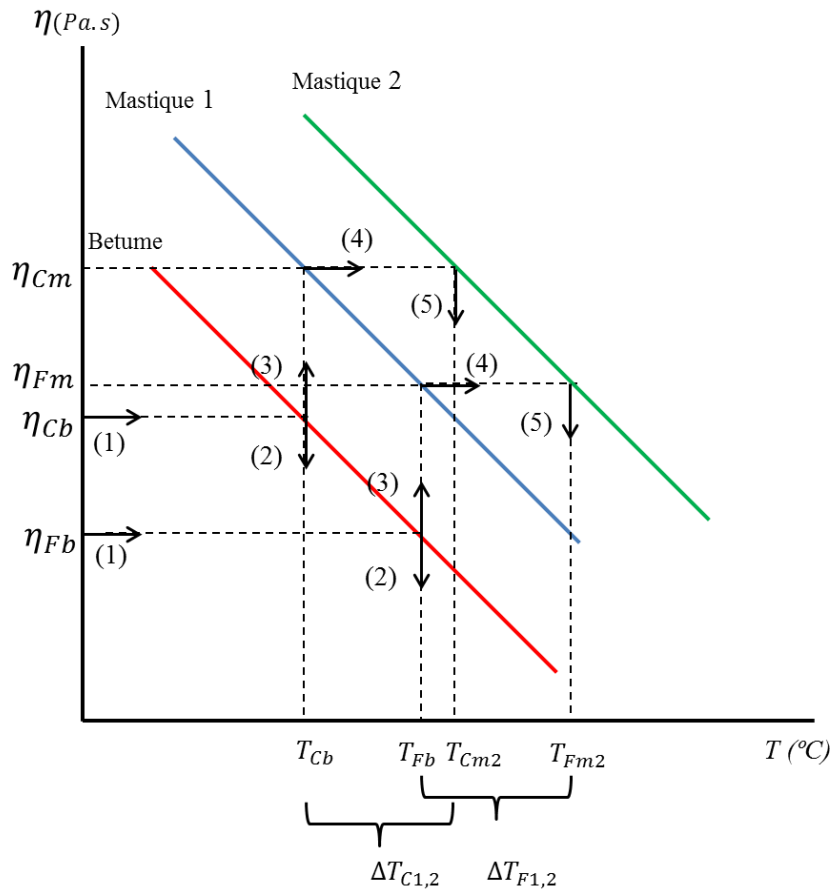


Figura 5.2 – Fluxograma para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques betuminosos.

Os passos 1 e 2 correspondem à determinação das temperaturas de fabrico, T_{Fb} , e compactação, T_{Cb} , dos betumes puros e modificados e as viscosidades a que corresponde cada temperatura, η_{Fb} e η_{Cb} , respetivamente, apresentadas na secção 5.2.

No passo 3, determinam-se as viscosidades do mastique de referência (mastique 1), η_{Fm} e η_{Cm} , constituído pelo fíler de maior granulometria (RC480), através das temperaturas obtidas para os betumes. De seguida, passo 4, aplicando as viscosidades de fabrico e compactação ao mastique 2, que

representa os restantes mastiques constituídos pelo fíler RC590 e a Cal-NHL5, obtém-se as respetivas temperaturas de fabrico e compactação, passo 5.

Os gráficos apresentados nesta secção incluem os resultados obtidos para cada mastique, para as temperaturas de fabrico e compactação obtidas para os betumes puros e modificados. Cada gráfico é constituído por uma análise da variação da temperatura verificada dos mastiques, resultante da adição do fíler ao betume que o originou, variação esta representada pelos gráficos em forma de barra, e pelas temperaturas de fabrico e compactação de cada betume. Para uma melhor compreensão dos gráficos apresentados, para os resultados obtidos, atribuiu-se um padrão a cada mastique de forma a distinguir o fíler que o constitui, sendo os resultados das variações das temperaturas retirados através do eixo principal à esquerda, e os resultados das temperaturas dos vários betumes analisados são lidos no eixo secundário à direita. Os elementos dos gráficos a azul e a vermelho dizem respeito às temperaturas de fabrico e compactação, respetivamente.

Embora o método Superpave determine temperaturas para os betumes modificados bastante superior às recomendadas pelos produtores, visto ser um método direcionado para a determinação das temperaturas dos betumes puros, é realizado um estudo da variação das temperaturas dos mastiques, usando as temperaturas dos betumes modificados determinadas por este método.

Com o método HSRV-E e no método ZSRV-S, as temperaturas consideradas para os betumes puros, correspondem às temperaturas determinadas pelo método Superpave.

No Anexo E, apresentam-se as equações que determinam a viscosidade dos mastiques com a variação da temperatura para as metodologias estudadas

5.3.1. Método A – Caderno de encargos da E.P. (2009)

- Método Superpave

Na Figura 5.3, apresentam-se os resultados da variação das temperaturas para os mastiques obtidas através da aplicação do método Superpave. Para a classe 35/50, verifica-se um decréscimo da variação de temperatura dos mastiques com o aumento da percentagem de polímero. Em relação à classe 50/70, os mastiques que contêm fíler RC590 continuam a apresentar um decréscimo da variação da temperatura com o aumento da quantidade de polímero. Contrariamente, os mastique produzidos com Cal-NHL5 apresentam variações de temperaturas superiores.

Em cada fíler verifica-se uma variação máxima aproximada de 4°C entre diferentes betumes. Por outro lado, para os mastiques da classe 35/50 a variação máxima entre os mastiques, com diferentes fileres, ronda os 4°C ao contrário dos mastiques da classe 50/70, que exibem variações entre 6°C e 13°C.

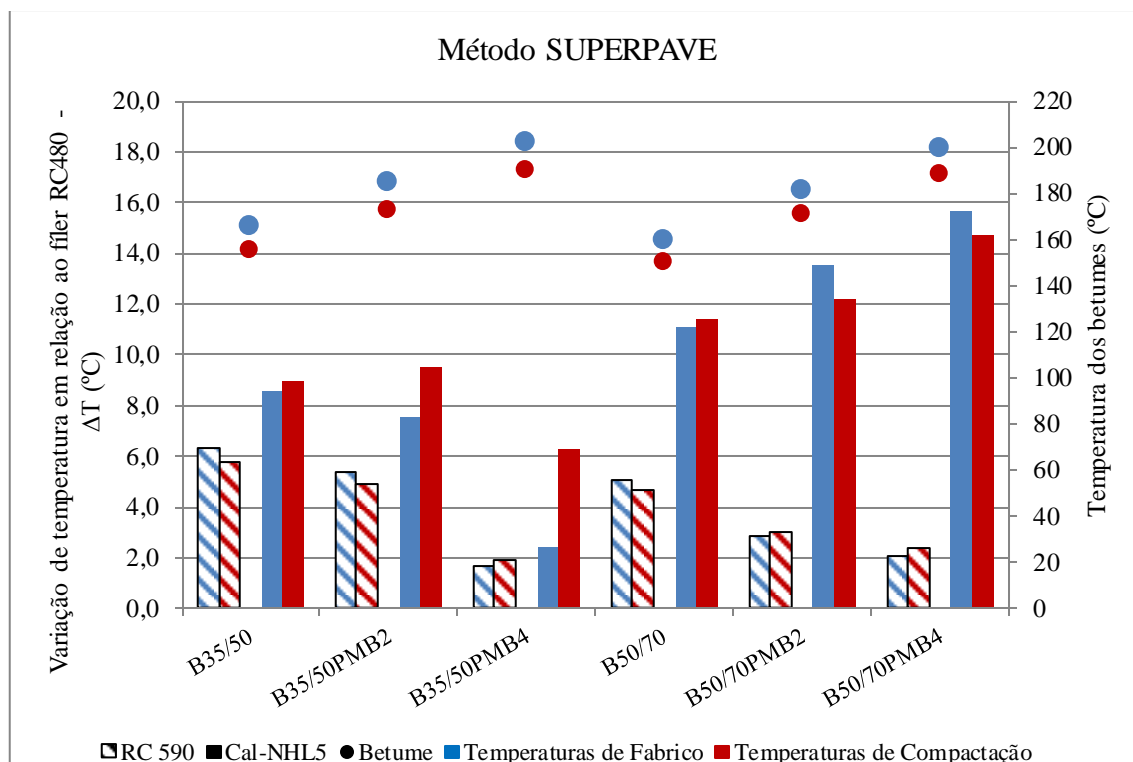


Figura 5.3 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método Superpave (Método A).

- Método da viscosidade a uma taxa de corte elevada (evolução) (HSRV-E)

Na Figura 5.4, apresentam-se os resultados da variação das temperaturas verificada para os mastiques obtidas através da aplicação do método HSRV-E. O resultado apresentado para mastiques com betumes puros de ambas as classes, corresponde à variação de temperatura verificada pelo método Superpave, visto que o método HSRV-E é recomendado para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de betumes modificados.

O comportamento dos mastiques é semelhante para ambos os tipos de filer. No que diz respeito aos mastiques da classe 35/50, os mastiques que contêm o filer RC590 apresentam uma variação constante entre os betumes puros e modificados. Em relação à Cal-NHL5, verifica-se uma variação das temperaturas de compactação superior, aumentado com a percentagem de polímero.

Para a classe 50/70 é de notar que a variação de temperatura dos mastiques com RC590 é praticamente igual. Os mastiques com Cal-NHL5 apresentam um comportamento idêntico ao dos mastiques da classe 35/50, com variações de temperatura superiores para concentrações de SBS mais altas.

Para o filer RC590 verifica-se uma variação máxima aproximada de 3°C entre diferentes betumes. Para a Cal-NHL5 a variação máxima é de 4°C entre os diferentes tipos de betume.

Por outro lado, para os mastiques da classe 35/50 a variação máxima entre os mastiques ronda os 2°C, enquanto os mastiques da classe 50/70 exibem variações de 7°C.

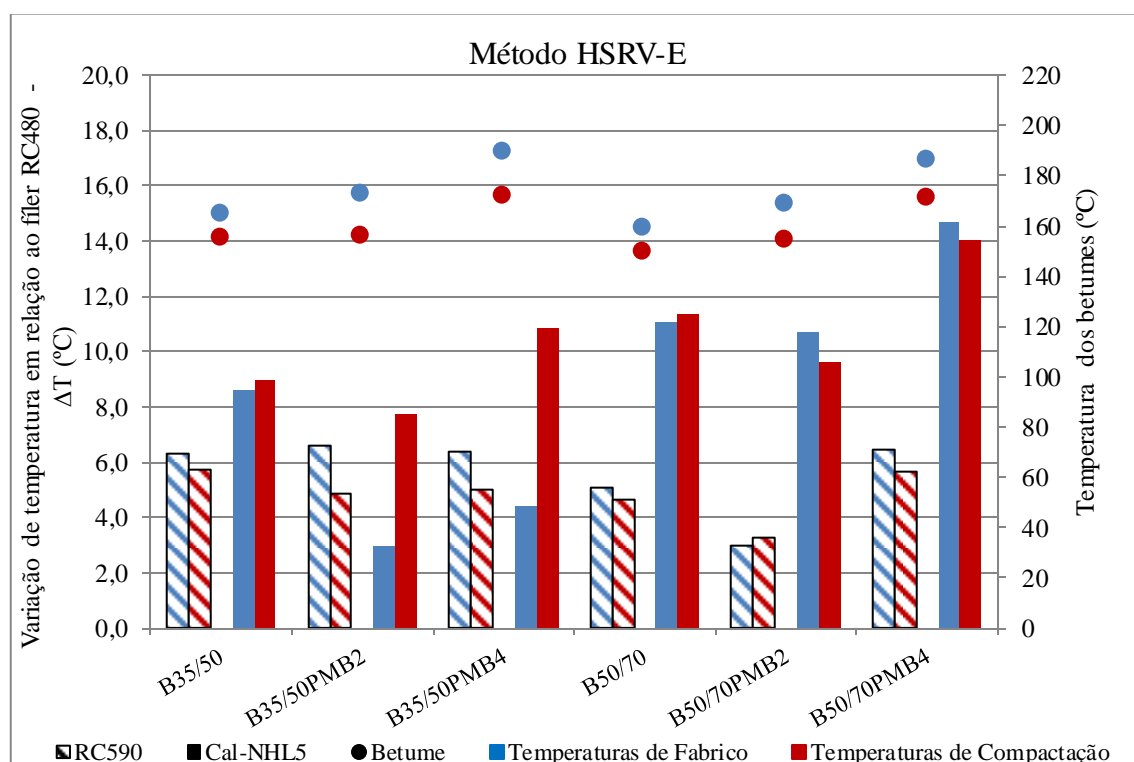


Figura 5.4 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método HSRV-E (Método A).

- Método da viscosidade a uma taxa de corte zero (simplificação) (ZSHV-S)

Na Figura 5.4, apresentam-se os resultados da variação das temperaturas verificada para os mastiques obtidas através da aplicação do método ZSHV-S. Tal como no método HSRV-E, o resultado apresentado para mastiques com betumes puros de ambas as classes, corresponde à variação de temperatura verificada pelo método Superpave, visto que este método é recomendado para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de betumes modificados.

Verifica-se que a variação de temperaturas dos mastiques com filer RC590 é semelhante nas duas classes de betume, decrescendo com o aumento da concentração de SBS. Apenas os mastiques que contêm Cal-NHL5 evidenciam alterações de comportamento em cada classe de betume. Na classe 35/50 verifica-se um aumento das temperaturas de serviço do betume B35/50 para os betumes modificados que, em ambas percentagens de polímero, exibem temperaturas de fabrico idênticas com uma diferença de apenas 2°C para as temperaturas de compactação.

Na classe 50/70 o comportamento dos mastique com Cal-NHL5 apresentam resultados semelhantes para o B50/70 e B50/70PMB4 enquanto o B50/70PMB2 apresenta uma variação ligeiramente menor em relação aos restantes betumes de 4°C.

Analisando em conjunto as duas classes, para o fíler RC590 verifica-se uma variação máxima aproximada de 4°C entre diferentes betumes. Para a Cal-NHL5 a variação máxima é de 8°C entre os diferentes tipos de betume.

Por outro lado, para os mastiques da classe 35/50 a variação máxima entre os mastiques com diferentes fileres ronda os 14°C, enquanto os mastiques da classe 50/70 exibem variações de 9°C.

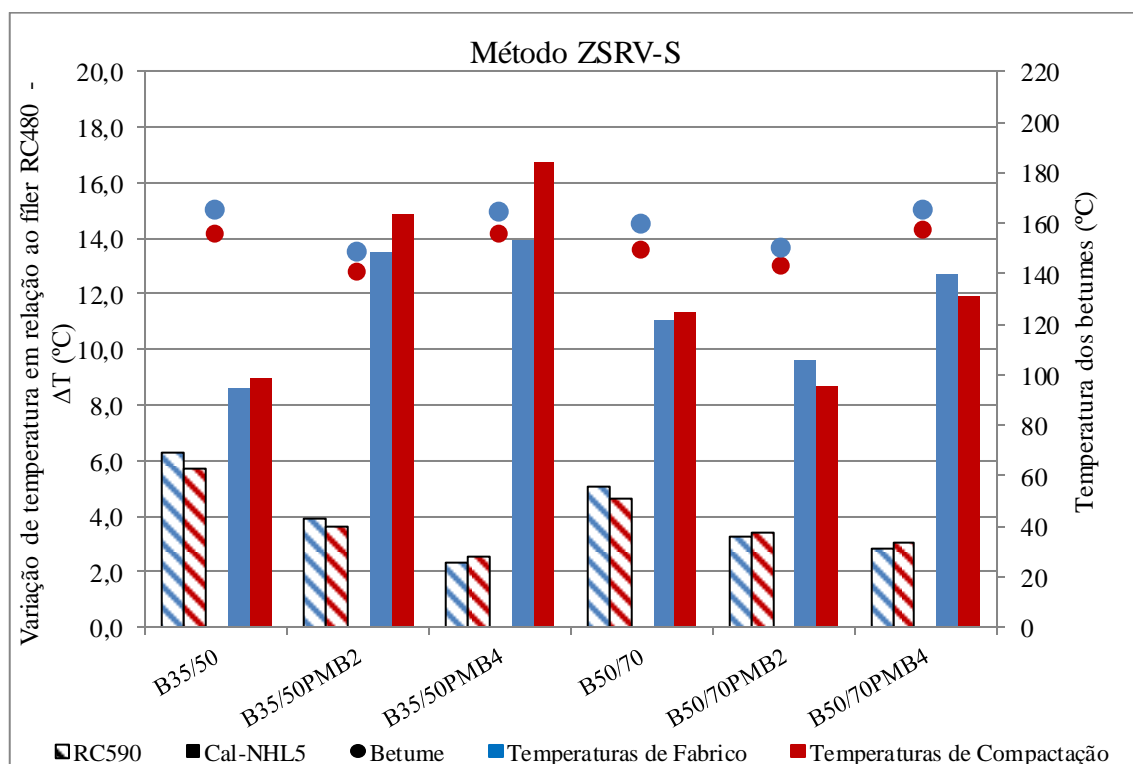


Figura 5.5 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método ZSRV-S (Método A).

5.3.2. Método B – caderno de encargos da JAE (1998)

- Método Superpave

Observando a Figura 5.6, verifica-se que, através do método Superpave, nas classes 35/50 e 50/70 o comportamento dos mastiques é similar. Na classe 35/50, os mastiques correspondentes a ambos os fileres apresentam variações de temperatura decrescentes, apesar de se verificar para o mástico B35/50PMB4 com Cal-NHL5 uma variação da temperatura de compactação superior. Os valores negativos verificados no mástico com o fíler RC590 e betume B35/50PMB4, deve-se ao facto de este fíler ter uma granulometria muito próxima do fíler RC480.

No que diz respeito à classe 50/70, todos os mastiques exibem variação constante em relação aos mastiques que contêm o fíler RC480, com resultados maiores para a Cal-NHL5.

Analisando em conjunto as duas classes, para o fíler RC590 verifica-se uma variação máxima aproximada de 5°C entre diferentes betumes. Para a Cal-NHL5 a variação máxima é de 9°C entre os diferentes tipos de betume.

Por outro lado, para os mastiques da classe 35/50 a variação máxima entre os mastiques com diferentes fileres ronda os 13°C, enquanto os mastiques da classe 50/70 exibem variações de 7°C.

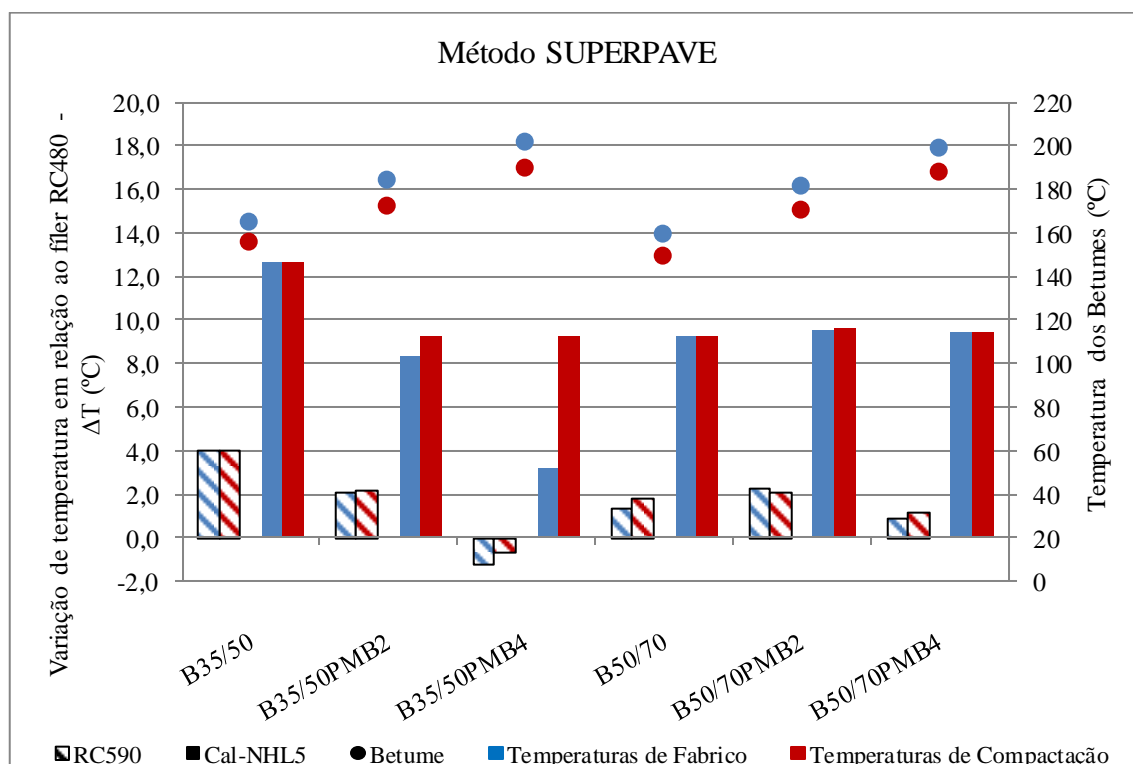


Figura 5.6 - Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método Superpave (Método B).

- Método da viscosidade a uma taxa de corte elevada (evolução) – HSRV-E

Pelo método HSRV-E, Figura 5.7, os mastiques da classe 35/50 produzidos com o fíler RC590, têm uma variação de temperatura idêntica nos betumes B35/50 e B35/50PMB4, ao contrário dos mastiques com Cal-NHL5, que apresenta uma variação da temperatura a decrescente com o aumento da concentração de polímero no betume. Os valores negativos verificados no mastique com o fíler RC590 e betume B35/50PMB2, deve-se ao facto de este fíler ter uma granulometria muito próxima do fíler RC480.

Na classe 50/70, o comportamento dos mastiques altera-se, constatando-se que com o fíler RC590 a variação das temperaturas de serviço é constante com o aumento da percentagem de polímero, enquanto os mastique com Cal-NHL5 a variação das temperaturas apresentam oscilações, verificando-se um aumento significativo da temperatura de fabrico para o mastique com o betume B35/50PMB2.

Analisando em conjunto as duas classes, para o filer RC590 verifica-se uma variação máxima aproximada de 2°C entre diferentes betumes. Para a Cal-NHL5 a variação máxima é de 8°C entre os diferentes tipos de betume.

Por outro lado, para os mastiques da classe 35/50 a variação máxima entre os mastiques com diferentes fileres ronda os 10°C, enquanto os mastiques da classe 50/70 exibem variações de 10°C, não contabilizando a variação de temperatura de fabrico do mastique B50/70PMB2 com Cal-NHL5, por evidenciar um valor anormal em comparação com as restantes temperaturas.

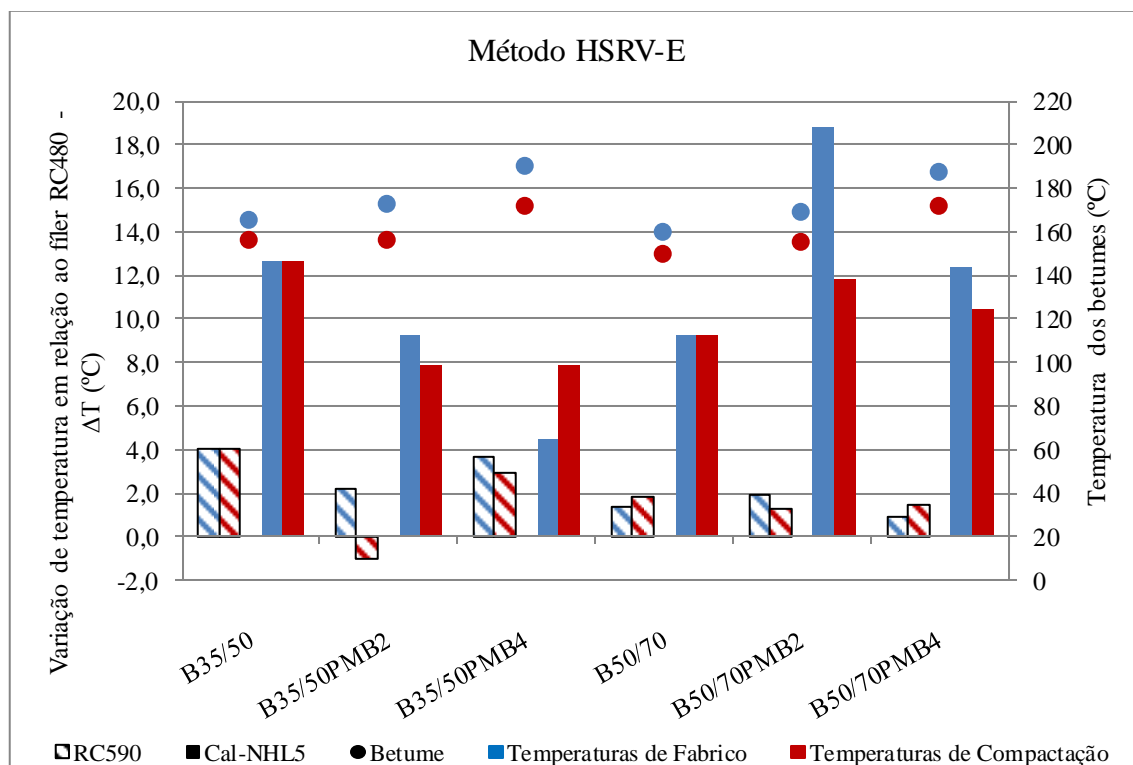


Figura 5.7 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método HSRV-E (Método B).

- Método da viscosidade a uma taxa de corte zero (simplificação) (ZSHV-S)

Na Figura 5.8, apresentam-se os valores da variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques para o método da ZSHV-S.

Da aplicação deste método observa-se um comportamento semelhante em todos os mastiques para as duas classes de betumes. Na classe 35/50, constata-se que a variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques tende a diminuir com o aumento da percentagem de polímero, embora esta variação seja ligeiramente mais acentuada para os mastiques com RC590. Para a classe 50/70, os mastiques apresentam valores praticamente constantes

Observando em conjunto as duas classes, para o filer RC590 verifica-se uma variação máxima aproximada de 4°C entre diferentes betumes. Para a Cal-NHL5 a variação máxima é de 4°C entre os diferentes tipos de betume.

Por outro lado, para os mastiques da classe 35/50 a variação máxima entre os mastiques com diferentes fileres ronda os 12°C, enquanto os mastiques da classe 50/70 exibem variações de 8°C.

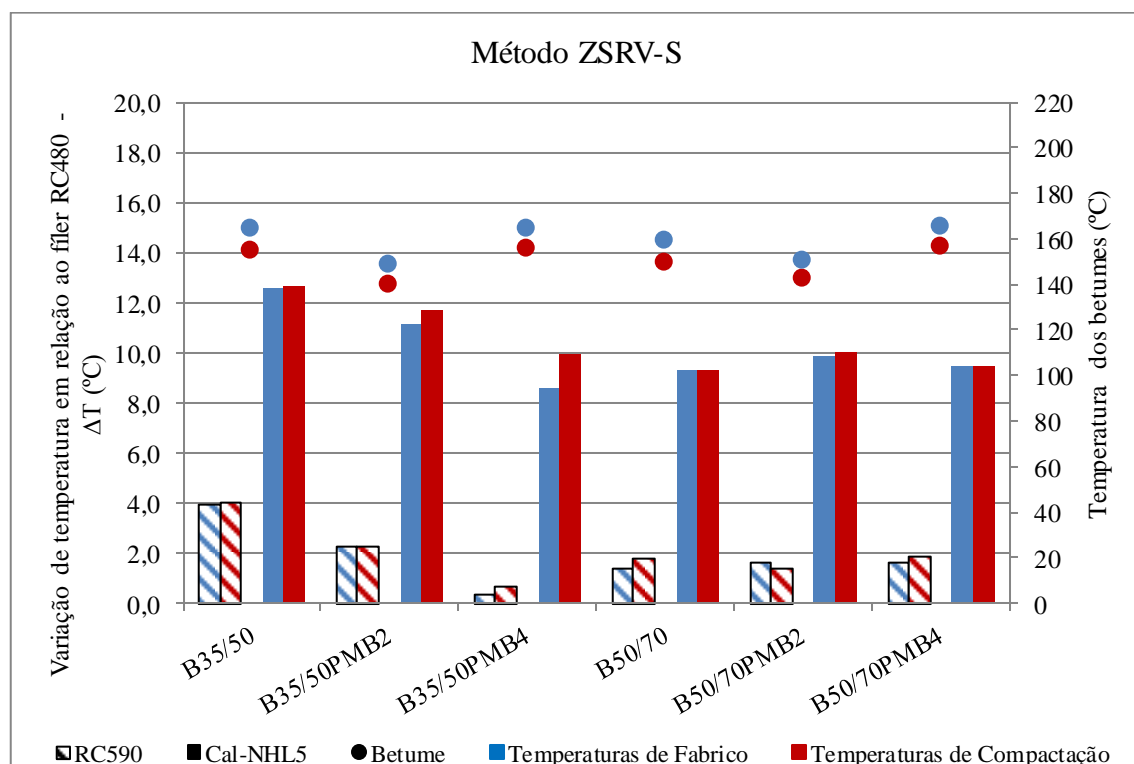


Figura 5.8 – Variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques determinadas pelo método ZSRV-S (Método B).

5.3.3. Comparação dos resultados

Após a análise dos resultados da variação das temperaturas em relação ao mastique de referência obtidos através dos vários métodos estudados para as duas relações ponderais aplicadas, verifica-se que o método Superpave, em ambas as formulações, apresenta comportamentos idênticos para a classe 35/50. Estes mastiques apresentam variações das temperaturas de serviço a rondar os 0°C e 6°C para o filer RC590 e de 2°C a 12°C para a Cal-NHL5. Em relação aos mastiques da classe 50/70, observa-se uma variação das temperaturas de fabrico compactação entre os 2°C e os 5°C para o filer RC590, entre os 8°C e os 16°C para a Cal-NHL5.

Pelo método HSRV-E, visto que a taxa de corte usada, $500s^{-1}$, se afasta das taxas de corte a que os betumes e mastiques foram ensaiados, os comportamentos verificados nas duas formulações são diferentes, ao contrário do que se observa nos restantes métodos que mantêm comportamentos

semelhantes. Conclui-se que para os mastiques da classe 35/50, o fíler RC590 adquire variações de temperaturas entre os 0°C e os 6°C e a Cal-NHL5 valores entre os 3°C e os 12°C. Nos mastiques da classe 50/70, observa-se uma variação entre os 1°C e os 6°C para o fíler RC590 e entre os 10°C e os 18°C para a Cal-NHL5.

O comportamento dos mastiques verificado através da aplicação do método ZSRV-S é similar para ambas as formulações, à exceção dos mastiques com Cal-NHL5 para a classe 35/50. Com a aplicação deste método resultam variações de temperatura entre o 2°C e os 4°C para o fíler RC590 e de 10°C e 16°C para a Cal-NHL5. Para os mastiques da classe 50/70 resultam variações das temperaturas de fabrico e compactação na ordem dos 2°C e os 4°C para o fíler RC590 e para a Cal-NHL5 verificam-se variações a rondar os 8°C.

É de salientar que, para os vários mastiques, o método Superpave e o método ZSRV-S são os que apresentam resultados mais próximos entre si, principalmente os resultados obtidos para os mastiques através do método B. Esta aproximação poderá dever-se ao facto de as taxas de corte aplicadas, $6,8 \text{ s}^{-1}$ para os dois métodos, se aproximar das taxas de corte ensaiadas laboratorialmente e, por isso, as equações obtidas através da modelação de Cross e lei de Potência apresentam um menor erro nas previsões do comportamento, quer dos mastiques como dos betumes usados.

Verifica-se ainda que os valores registados para os mastiques com Cal-NHL5, para a classe 50/70, obtidos através da primeira formulação mencionada com o método Superpave em comparação com o método da HSRV-S são bastante próximos, com variações de temperatura entre os 10°C e os 16°C.

Considerando os limites de trabalhabilidade para os mastiques propostos por Bahia *et al.*, mencionado na secção 3.2, determinou-se a relação entre os masticos produzidos, embora as relações f/b sejam superiores à utilizada nos estudos realizados por este autor (relação f/b de 1:1 em termos de massa). Nos quadros 5.8 e 5.9, apresentam-se os valores da viscosidade relativa dos mastiques a 135°C com a respetiva verificação do cumprimento do limite máximo proposto, ou seja, uma viscosidade relativa inferior a 5.

Quadro 5.8 – Verificação da trabalhabilidade dos mastiques da classe 35/50.

Classe	Método		A		B	
	Tipo	Fíler	V.R (135°C)	Limite Mastique.	V.R (135°C)	Limite Mastique.
35/50	Puro	RC480	6,73	NÃO	3,00	SIM
		RC590	8,00	NÃO	3,61	SIM
		Cal-NHL5	11,31	NÃO	5,69	NÃO
	M2%	RC480	6,39	NÃO	3,50	SIM
		RC590	7,47	NÃO	3,89	SIM
		Cal-NHL5	13,81	NÃO	6,85	NÃO
	M4%	RC480	8,99	NÃO	3,71	SIM
		RC590	10,30	NÃO	3,83	SIM
		Cal-NHL5	-	-	7,71	NÃO

Quadro 5.9 – Verificação da trabalhabilidade dos mastiques da classe 50/70.

Classe	Método		A		B	
	Tipo	Fíler	V.R (135°C)	Limite Mastique.	V.R (135°C)	Limite Mastique.
50/70	Base	RC480	6,70	NÃO	3,61	SIM
		RC590	7,68	NÃO	5,03	NÃO
		Cal-NHL5	11,95	NÃO	5,72	NÃO
	M2%	RC480	4,01	SIM	2,45	SIM
		RC590	4,77	SIM	2,67	SIM
		Cal-NHL5	6,79	NÃO	3,83	SIM
	M4%	RC480	3,73	SIM	2,11	SIM
		RC590	4,36	SIM	2,39	SIM
		Cal-NHL5	6,94	NÃO	3,36	SIM

Verifica-se que para as relações fíler-betume aplicadas neste trabalho, os mastiques da classe 35/50 fabricados através do método A, não respeitam os limites, sendo que os mastiques com fíler RC480 os que mais se aproximam desse limite. Para os mastiques com Cal-NHL5, o valor da viscosidade relativa não foi determinado visto que, laboratorialmente, não foi possível o cálculo da viscosidade dinâmica aos 135°C. Para os mastiques com os fíleres RC480 e RC590 pertencentes à metodologia B, os valores da viscosidade relativa respeitam o limite proposto, enquanto que para a Cal-NHL5 este limite é superior.

Em relação aos mastiques da classe 50/70, verifica-se que os mastiques do método A com betume puro não respeitam os limites, ao passo que, os mastiques com os betumes modificados, já apresentam valores da viscosidade relativa dentro dos limites aceitáveis, à exceção da Cal-NHL5. Em relação ao método B, os valores da viscosidade relativa estão dentro do limite nomeado para a maioria dos fíleres, embora os mastiques com betume base e com o fíler RC590 e a Cal-NHL5 continuem com valores ligeiramente superiores.

Comparando os mastiques produzidos com uma relação fíler-betume proposta pelo método A, verifica-se que, em ambas as classes, os mastiques com betume base exibem valores das viscosidades relativas semelhantes, observando-se o mesmo para os mastiques do método B.

No Quadro 5.10, apresentam-se os valores das relações fíler-betume usadas no fabrico dos mastiques.

Quadro 5.10 - Relações Fíler-Betume utilizadas.

Fíler	Relação Fíler-Betume		$\Delta \frac{f}{b}$
	Método A	Método B	
RC480	1,68	1,2	0,48
RC580	1,70		0,50
Cal-NHL5	1,57		0,37

A análise dos valores apresentados no Quadro 5.10 permite concluir que para uma relação fíler-betume unitária deverão cumprir o requisito de viscosidade, visto que para a relação fíler-betume do método B a maioria dos valores da viscosidade relativa são inferiores a 5.

No Quadro 5.11 indicam-se os valores da concentração crítica e da concentração volumétrica de cada fíler e para cada método, obtidos através da Equação (3.1) e da Equação (3.2).

Segundo Pinilla esta formulação recomenda uma concentração volumétrica de fíler dos mastiques igual ou menor à concentração crítica. Verifica-se que os valores obtidos mastiques fabricados através da formulação apresentada pelo método A e pelo método B, estão dentro dos limites recomendados por Pinilla, isto é, a concentração volumétrica de fíler é igual ou menor à concentração crítica. Segundo este autor as misturas betuminosas fabricadas com os mastiques estudados têm uma boa resistência à fadiga.

Caso a análise seja realizada de acordo com os limites recomendados por Santana (1995), os valores da concentração volumétrica de fíler deverá ser entre 10% a 20% inferior à concentração crítica. Verifica-se que ambos os métodos não estão de acordo com os limites propostos, ou seja, o método A determina uma concentração volumétrica de fíler elevada, enquanto o método B define uma concentração volumétrica de fíler ligeiramente inferior à recomendada, como mostra o Quadro 5.11.

Quadro 5.11 - Concentração crítica e concentração volumétrica de fíler.

Método A			
Fíler	C_s	C	ΔC (%)
RC480	0,39	0,39	0
RC590	0,39	0,39	0
Cal-NHL5	0,37	0,37	0
Método B			
Fíler	C_s	C	ΔC (%)
RC480	0,32	0,24	22,94
RC590	0,31	0,24	23,00
Cal-NHL5	0,31	0,23	23,18

De modo a concluir a análise dos betumes e mastiques, representa-se nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 a combinação do efeito do polímero SBS e do fíler nas temperaturas de fabrico e compactação. Cada figura corresponde a um dos métodos de determinação de temperaturas utilizados, onde se apresenta graficamente a variação das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos betumes puros e a variação total das temperaturas provocada pela adição de fíler em relação ao mastique de referência (betume+RC480). A variação das temperaturas dos betumes modificados em relação ao betume puro, ΔT_{Betume} , representa-se a azul. Em relação aos mastiques, ΔT_B , representado a verde, corresponde à variação das temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques formulados pelo método B enquanto ΔT_{AB} , representada a vermelho, corresponde à diferença de variações de temperatura dos mastiques formulados pelos métodos A e B ($\Delta T_A - \Delta T_B$). No caso de $\Delta T_{AB} < 0$, a variação de temperatura determinada para um mastique, relativamente ao fíler RC480, é superior quando os mastiques são formulados pelo método B; de outra

forma, existe uma redução do aumento de temperatura determinado para o filer RC590 ou cal relativamente ao RC480 com a relação mais elevada de f/b (método A).

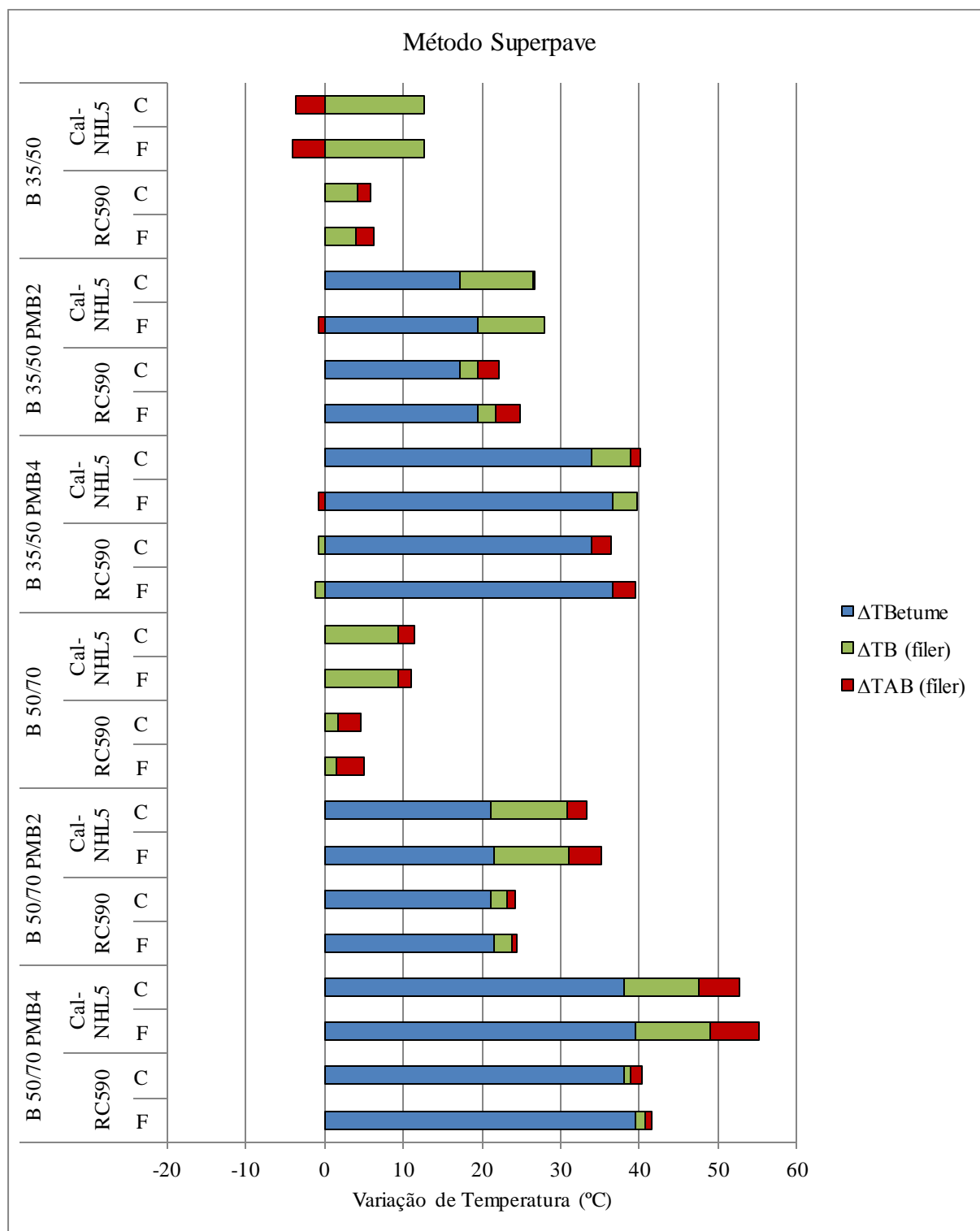


Figura 5.9 – Contribuição do polímero e dos fileres no aumento das temperaturas de fabrico e compactação em relação aos betumes puros e mastique de referência (método Superpave).

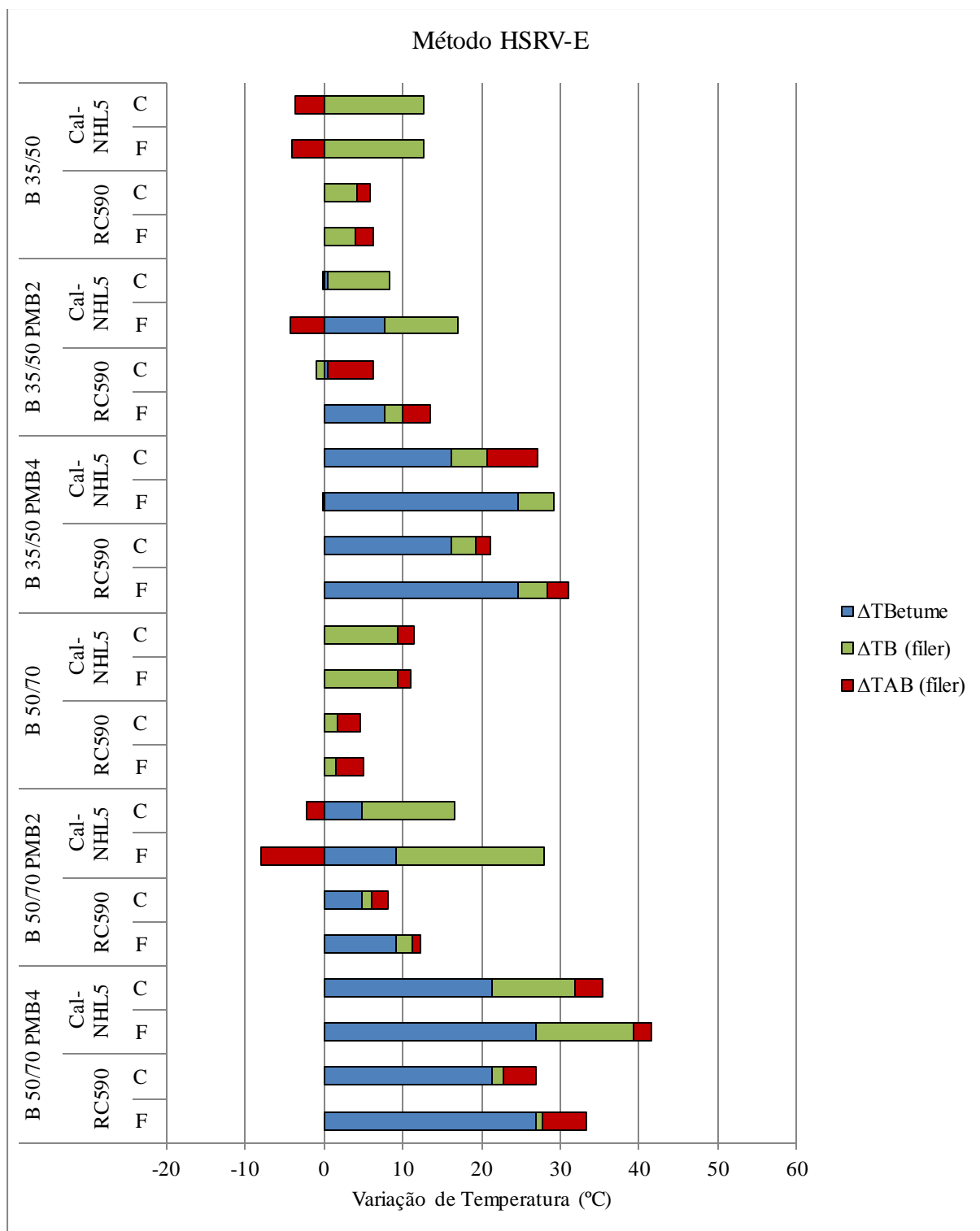


Figura 5. 10 - Contribuição do polímero e dos fileres no aumento das temperaturas de fabrico e compactação em relação aos betumes puros e mastique de referência (método HSRV-E).

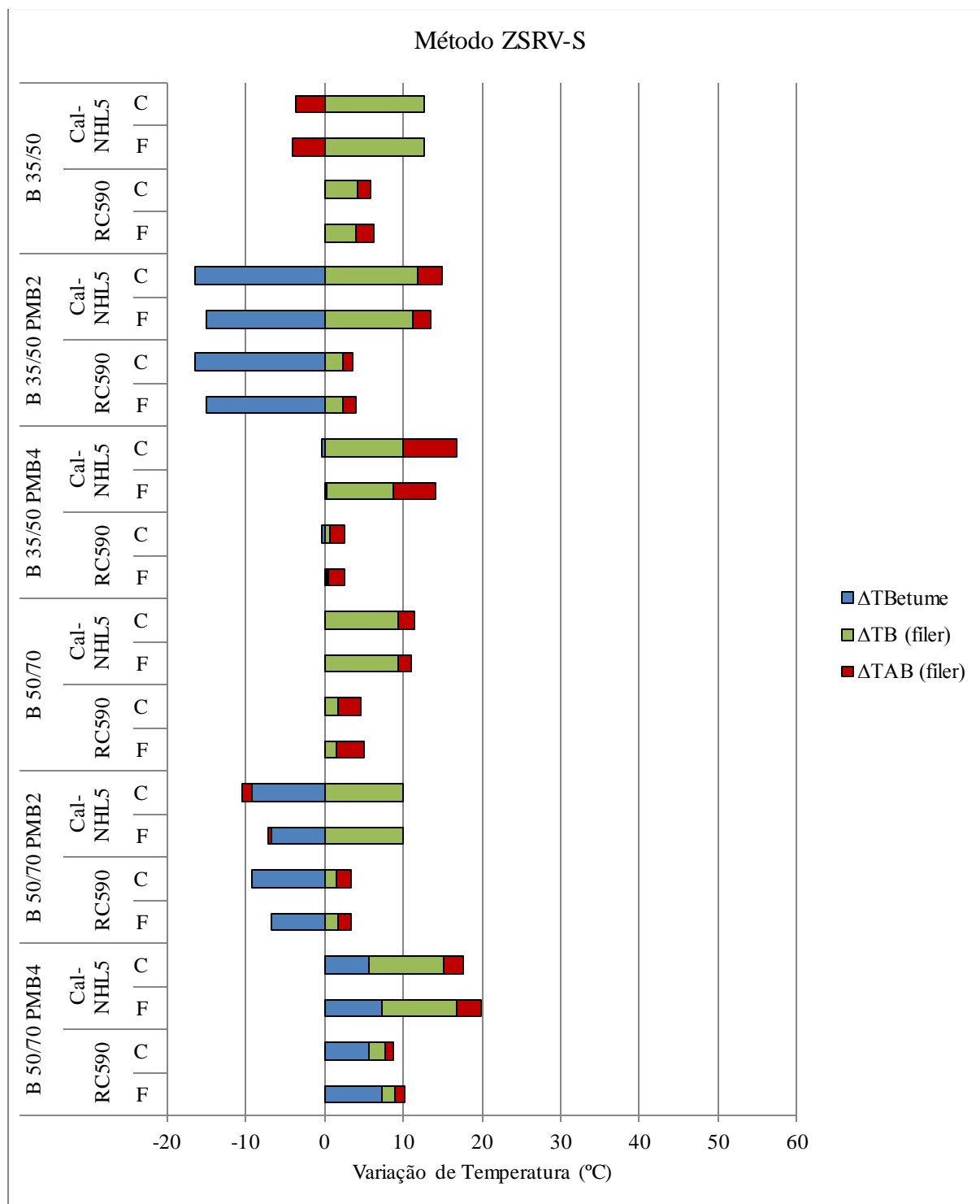


Figura 5.11 - Contribuição do polímero e dos fileres no aumento das temperaturas de fabrico e compactação em relação aos betumes puros e mastique de referência (método ZSRV-S).

A análise das Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 permite completar a interpretação dos resultados anteriormente realizada para os betumes e para os mastiques.

Com a aplicação do método Superpave aos mastiques com betumes puros, a variação de temperatura total será exclusivamente resultante da adição de filler ao betume, visto que os betumes puros são os betumes de referência. A variação de temperatura máxima verifica-se no mastique B35/50+Cal-NHL5, com valores de 8,6°C e 9,0°C para as temperaturas de fabrico e compactação, respetivamente. Em relação aos mastiques betuminosos com betumes modificados, a variação máxima de temperatura devido à adição de polímero e de filler verifica-se no mastique B35/50PMB4+Cal-NHL5, com um máximo de 55,2°C (39,5°C devido ao betume e 15,7°C devido ao filler) e 52,8°C (38,1°C devido ao betume e 14,7°C devido ao filler) para as temperaturas de fabrico e compactação, respetivamente.

O método HSRV-E reduz a variação das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação ao método Superpave. Para os betumes com 2% de polímero verifica-se uma redução de mais de metade do valor registado pelo método Superpave, para ambas as classes. Constata-se que as temperaturas de fabrico requerem em média mais 6°C em relação às temperaturas de compactação. Em relação aos mastiques betuminosos com betumes modificados, a variação máxima de temperatura devido à adição de polímero e de filler verifica-se no mastique B35/50PMB4+Cal-NHL5, com um máximo de 41,6°C (26,9°C devido ao betume e 14,7°C devido ao filler) e 35,3°C (21,3°C devido ao betume e 14,0°C devido ao filler) para as temperaturas de fabrico e compactação, respetivamente.

O método ZSRV-S determina temperaturas bastante mais baixas em relação aos outros métodos. Para os betumes com 2% de polímero, o método ZSRV-S apresenta temperaturas inferiores em relação aos betumes puros. Para os betumes com 4% de polímero, a variação de temperatura registada por este método é bastante baixa em relação aos betumes puros. Em relação aos mastiques betuminosos com betumes modificados, a variação máxima de temperatura devido à adição de polímero e de filler verifica-se, novamente, no mastique B35/50PMB4+Cal-NHL5, com um máximo de 19,9°C (7,2°C devido ao betume e 12,7°C devido ao filler) e 17,7°C (5,7°C devido ao betume e 12,0°C devido ao filler) para as temperaturas de fabrico e compactação, respetivamente. Através deste método verifica-se que na maioria dos mastiques, independentemente do tipo de filler, o aumento de temperatura está mais dependente da adição do filler ao betume. Por exemplo, para o mastique B35/50PMB4 o betume modificado tem uma contribuição praticamente nula no aumento das temperaturas, enquanto o filler tem uma contribuição de 13,9°C e 16,8°C no aumento das temperaturas de fabrico e compactação, respetivamente.

A análise dos gráficos permite concluir que para método Superpave e para o método HSRV-E, as temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques com betumes modificados é mais influenciada pela quantidade de polímero, verificando-se o oposto com o método ZSRV-S. Em média a adição de filler contribui para um aumento de 10°C.

6. Conclusão e desenvolvimentos futuros

6.1. Conclusão

Os mastiques betuminosos são considerados o verdadeiro ligante betuminoso das misturas betuminosas. Sendo constituídos por agregados finos, os mastiques betuminosos e os seus componentes, especialmente o fíler, afetam significativamente as propriedades e o comportamento das misturas betuminosas. Este trabalho teve como principal objetivo o estudo da influência do fíler, na determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes puros e modificados. A primeira parte incidiu num estudo reológico dos betumes e dos mastiques, avaliando o seu comportamento e a interação fíler-ligante. A segunda parte consistiu na determinação da variação da temperatura de fabrico e compactação dos betumes puros e modificados, após a adição do fíler.

O tratamento e a análise dos resultados obtidos através dos ensaios realizados e das metodologias aplicadas para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação, permitiram retirar conclusões sobre o comportamento reológico dos mastiques betuminosos, verificando o comportamento reológico dos betumes, e também sobre as temperaturas de fabrico e compactação, principalmente sobre o efeito do fíler na determinação das temperaturas.

As duas formulações para os mastiques permitiram fabricar mastiques com relações f/b bastante distintas. Os mastiques formulados pelo método A (E.P.) têm uma relação volumétrica f/b diferentes entre eles, visto que no cálculo da relação f/b são consideradas duas características distintas de cada fíler, os vazios de Rigden e, posteriormente, na definição da quantidade de fíler considera-se a massa volúmica. O método B (ex-JAE) determina uma relação ponderal f/b igual para todos os mastiques. Para este método escolheu-se uma relação f/b inferior às relações f/b obtidas para cada fíler através do método A.

No que diz respeito ao comportamento reológico dos mastiques betuminosos verifica-se que:

- A adição de fíler aos betumes provoca o aumento da viscosidade, da temperatura de amolecimento e reduz a penetração.
- O método A apresenta mastiques com valores superiores na variação penetração, na temperatura de amolecimento e na viscosidade dos mastiques comparativamente com o método B.
- O efeito da Cal-NHL5 é bastante superior ao dos restantes fíleres. O método A determina uma relação f/b para a Cal-NHL5 inferior aos fíleres RC480 e RC590, contudo a variação da penetração e da temperatura de amolecimento aumenta em relação aos restantes fíleres.

- De acordo com as exigências impostas pelo método A, para a relação volumétrica f/b correspondente à média das relações volumétricas f/b obtidas para $\Delta T_{ab} = 12^{\circ}C$ e $\Delta T_{ab} = 16^{\circ}C$, de modo a otimizar o comportamento dos mastiques, apenas se obteve resultados dentro deste intervalo em quatro mastiques. Esta formulação não diminui as diferenças de comportamento para os mastiques com o mesmo betume e diferente tipo de fíler.
- A viscosidade dos mastiques betuminosos aumenta para relações f/b superiores.
- Os mastiques da classe 35/50 exibem viscosidades superiores aos mastiques da classe 50/70, permitindo concluir que o polímero SBS interage mais com os fíleres em betumes com gama de penetração mais baixas.
- A Cal-NHL5 confere aos mastiques elevada rigidez, sendo mais experimentada nos mastiques produzidos com betumes modificados.
- Com a adição dos fíleres, os mastiques exibem um comportamento reológico não-Newtoniano do tipo *shear-thinning*.
- A Cal-NHL5 exhibe valores de viscosidades muito acima dos outros dois fíleres, que por terem características semelhantes, ostentam viscosidade parecidas.
- Embora o cálculo dos tempos de sedimentação dos vários fíleres permita a medição da viscosidade dos mastiques dentro do tempo mínimo estabelecido, o seu efeito no comportamento reológico dos betumes não é desprezado.

Em relação às temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques betuminosos, chegou-se às seguintes conclusões, no que diz respeito à influência do polímero SBS e dos fíler na sua determinação:

- As temperaturas obtidas para os betumes puros através do método Superpave são consideradas satisfatórias, embora se afastem ligeiramente dos intervalos indicados pelos produtores. No que diz respeito aos betumes modificados, as temperaturas obtidas afastam-se completamente dos intervalos recomendados, como era esperado, daí não ser aconselhada a determinação das temperaturas dos betumes modificados através deste método.
- Através do método HSRV-E tem-se temperaturas de fabrico e compactação inseridas nos intervalos recomendados para os betumes modificados com 2% de SBS. Para os betumes PMB4, as temperaturas são bastante elevadas em ambas as classes, sendo que as temperaturas de fabrico são superiores a $180^{\circ}C$.
- O método ZSRV-S apenas determinou temperaturas de fabrico e compactação aceitáveis de acordo com os intervalos recomendados para os betumes modificados com 4% de polímero.

- Em todas as metodologias verifica-se que a variação das temperaturas de fabrico e compactação são bastante semelhantes em ambos os métodos de formulação dos mastiques.
- O método A não diminui a diferença de temperaturas entre os vários mastiques para as três metodologias estudadas. Para o filer RC590, o método Superpave e o método ZSRV-S, apresentam uma tendência constante da variação das temperaturas com o aumento da concentração de SBS para a classe 35/50 e para a classe 50/70 exibe uma tendência crescente, enquanto para o método HSRV-E o oposto acontece. Nos mastiques com Cal-NHL5, para a classe 35/50, o método Superpave tem variações de temperaturas decrescentes com o aumento da percentagem de SBS, enquanto para os restantes métodos, a variação das temperaturas de fabrico e compactação tendem a crescer com o aumento da concentração de SBS.
- Com o método B, os mastiques da classe 35/50 apresentam uma tendência decrescente da variação da temperatura com o aumento da percentagem de polímero, enquanto para a classe 50/70, a variação de temperatura dos matiques mantem-se constante.
- Em média, os mastiques com RC590 requerem variações de temperatura de 4°C para o método A e de 2°C para o método B e com a Cal-NHL5, os mastiques exigem um aumento de temperatura a rondar os 10°C com os dois métodos.
- Em todos os métodos, o aumento das temperaturas de fabrico e compactação dos betumes modificados em relação aos puros é mais influenciada pela quantidade de polímero, a um máximo de 40°C. Os fileres têm uma contribuição média no aumento das temperaturas de cerca de 10°C.
- Concluindo, a introdução de índice de vazios de Rigden dos fileres, uma das suas características físicas, na formulação dos mastiques betuminosos pode ser considerada uma melhoria, embora seja necessário a realização de estudos mais aprofundados, visto que as diferenças de comportamento entre os vários mastique não reduziu com a introdução desta característica.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Os resultados obtidos revelaram que algumas considerações na determinação das temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas devem ser melhoradas. Atendendo-se a esta necessidade, propõe-se que seja desenvolvida uma nova metodologia de determinação das temperaturas de fabrico e compactação que inclua os fileres, visto que o mastique betuminoso é considerado o verdadeiro ligante numa mistura betuminosa.

Sugere-se o desenvolvimento de uma nova metodologia que determine a relação f/b ótima a aplicar nas misturas betuminosas, tendo em consideração outras características dos fíleres para além dos vazios de Rigden, por exemplo, o poder de adsorção, de modo a considerar as características superficiais de cada fíler, permitindo melhor avaliação da interação agregado-betume.

Por outro lado, propõe-se a realização de um estudo que considere as variações de temperatura estimadas, no processo de fabrico e compactação de misturas betuminosas, aplicando os métodos de determinação da relação f/b referido neste trabalho

Por fim, sugere-se a realização de um trecho experimental, apoiado na formulação de mastiques betuminosos apresentada neste trabalho e as variações de temperatura médias originadas pelos agregados mais finos, especialmente o fíler, de modo a avaliar o comportamento mecânico e a qualidade das misturas betuminosas.

Referências bibliográficas

- [1] BRANCO, Fernando *et al.* – *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra, Almedina, 2006.
- [2] SILVA, Hugo dias da – *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique*. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2005.
- [3] MICAELO, Rui – *Compactação de Misturas Betuminosas*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [4] SANTOS, André – *Temperaturas de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas com betumes Modificados*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Lisboa, 2011.
- [5] Cepsa – *Capítulo 5: Misturas Betuminosas*. s.d.
http://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Admin_WebMaster/Contenidos_comunes/Documentos/Cap%205.pdf (Novembro, 2011).
- [6] DELAPORTE, Brice *et al.* – *New Mastics And Mixtures Made With Ultrafine Particles: Presentation and Linear Properties*, 4th Euraspalt Eurobitumen Congress, Copenhagen, pp. 8, 2008.
- [7] YILDIRIM, Yetkin *et al.* - *Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*. Report nº 1250-5, Austin, University of Texas, 2000.
- [8] BARNES, Howard A. *et al.* - *An Introduction to Rheology*. Amsterdam, Elsevier, 1989.
- [9] Brookfield Engineering Laboratories - *MORE SOLUTIONS TO STICKY PROBLEMS*. Middleboro, Brookfield Engineering Laboratories.
- [10] CAVADAS, Adélio - *Hidrodinâmica de jactos de impacto confinados escoamento de fluidos newtonianos e não newtonianos*. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, Porto, 2008.
- [11] BARNES, Howard A. - *A Handbook of Elementary Rheology*. Aberystwyth, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
- [12] AIREY, G; Westwood, D. – *High Temperature of Polymer and Filer Modified Binder Systems*, 3rd Euraspalt & Eurobitume Congress Vienna 2004, Viena-Austria, 2004.
- [13] AIREY, G. – *Viscosity -Temperature Effects of Polymer Modification as Depicted by Heukelom's Bitumen Test Data Chart*, International Journal of Pavement Engineering, 2: 4, 223 – 242, 2001.
- [14] BARDINI, Vivian Silveira – *A Importância do Filer para o Bom Desenvolvimento de Misturas Asfálticas*, Minerva, 2009, [http://www.fipai.org.br/Minerva%2007\(01\)%2009.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2007(01)%2009.pdf) (Fevereiro, 2012).
- [15] COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 13043:2002 - *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*. Bruxelas, CEN, Setembro 2002.

- [16] FAHEEM, Ahmed Fatin – *Modeling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction*, PhD Thesis, University of Wisconsin, Madison, EUA, 2009.
- [17] ROMANO, R.C.O et al. – Influência da Condição de Mistura na Dispersão da Sílica Ativa. 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Brasil, 2005.
- [18] E.P. – *Caderno de Encargos do Tipo Obras (CETO)*, Estradas de Portugal, Portugal, 2009.
- [19] BARDINI, Vivian Silveira – *Estudo de Viabilidade Técnica da Utilização de Cinzas da Queima da Casca de Pinus em Obras de Pavimentação Asfáltica*, Tese de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2008.
- [20] FAHEEM, Ahmed Fatin et al. – *Influence of Filler Fractional Voids on Mastic and Mixture Performance*, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., USA,
- [21] QUARESMA, L.; Antunes, M. L. – *Filer granítico em misturas betuminosas*, Rel. Proc. 92/01/12647, LNEC, Lisboa.
- [22] BAHIA, Hussain et al. – *Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Project 9-45, University of Wisconsin, Madison, EUA, 2011.
- [23] JAE – *Caderno de Encargos Tipo Obra*, Junta Autónoma de Estradas, Lisboa, 1998.
- [24] ASTM D 242-95 – *Standard Specification for Mineral Filler For Bituminous Mixtures*, ASTM, USA, 2000.
- [25] Asphalt Institute - *Superpave Mix Design*. Lexington, 1997.
- [26] DNER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM, EM 367/97 – *Material de enchimento para misturas betuminosas*, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.
- [27] Departamento de transportes- Capítulo 8, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, <http://www.transportes.ufba.br/Arquivos/ENG216/CAP8.pdf> (Dezembro, 2012).
- [28] PG3 – *Pliego de Prescripciones Técnicas Generale para obras de Carreteras y Puentes*, Espanha, 2004.
- [29] CRR – *Code de Bonne Pratique pour la Formulation des Enrobés Bitumineux. Recommandation CRR – R 69/97*, Centre de Recherches Routières, Bruxelles, 1997.
- [30] BRISA – *Caderno de Encargos*, Portugal, 2006.
- [31] European Asphalt Pavement Association – *The use of Warm Mix Asphalt. European Asphalt Pavement Association*. Brussels, European Asphalt Pavement Association, 2010. http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/the_use_of_warm_mix_asphalt_january_2010.pdf (Janeiro 2012).
- [32] Asphalt Institute - *Laboratory Mixing and Compaction Temperatures*. Asphalt Institute Technical Bulletin. Lexington, Asphalt Institute, s/d. <http://www.asphaltinstitute.org/dotAsset/de11ce66-bdc9-43fb-84f0-ff5706719e5f.pdf> (Novembro, 2011)

- [33] BAHIA, Hussain U. et al. – *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 459, Washington, D.C., Transportation Research Board - National Research Council, 2001.
- [34] READ, John; Whiteoak, David - *The Shell Bitumen Handbook*. London. Thomas Telford, 2003.
- [35] Federal Highway Administration – *SUPERPAVE MIXTURE, Design Guide*. Federal Highway Administration, Washington, D.C, USA, 2001.
- [36] WEST, Randy C. et al. - *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Report 648, Washington, D.C., Transportation Research Board, 2010.
- [37] Stuart, Kevin D. – *Methodology for Determining Compaction Temperatures for Modified Asphalt Binders*. FHWA-RD-02-016, McLean, Federal Highway Administration, 2001.
- [38] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 1426:2007 - *Bitumen and bituminous binders - Determination of needle penetration*. Brussels, CEN, March 2007.
- [39] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 1427:2007 - *Bitumen and bituminous binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method*. Brussels, CEN, March 2007.
- [40] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 13302:2010 - *Bitumen and bituminous binders - Determination of viscosity of bitumen using a rotating spindle apparatus*. Brussels, CEN, March 2010.
- [41] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 13632:2003 - *Bitumen and bituminous binders - Visualization of polymer dispersion in polymer modified bitumen*. Brussels, CEN, May 2010.
- [42] COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO (CEN) – NP EN 12591:2011 – Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação, Bruxelas, CEN, 2011.
- [43] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 14023:2005 - *Bitumen and bituminous binders - Framework specification for polymer modified bitumens*. Brussels, CEN, October 2005.
- [44] AIREY, G – Styrene butadiene styrene polymer modification of road bitumen, *Journal of material science*, 951 – 959, 2004.

Anexo A – Caracterização do comportamento reológico dos betumes Puros

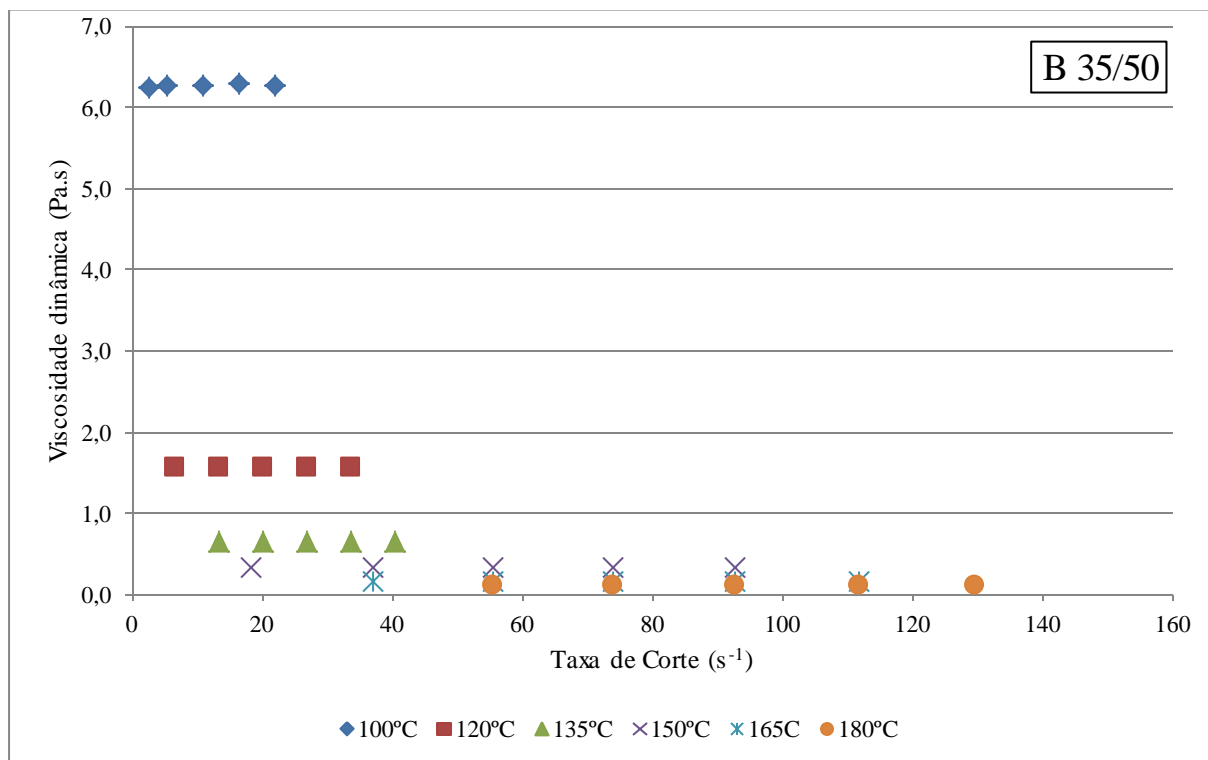


Figura A.1 – Viscosidade dinâmica do betume B 35/50, para várias temperaturas e taxas de corte.

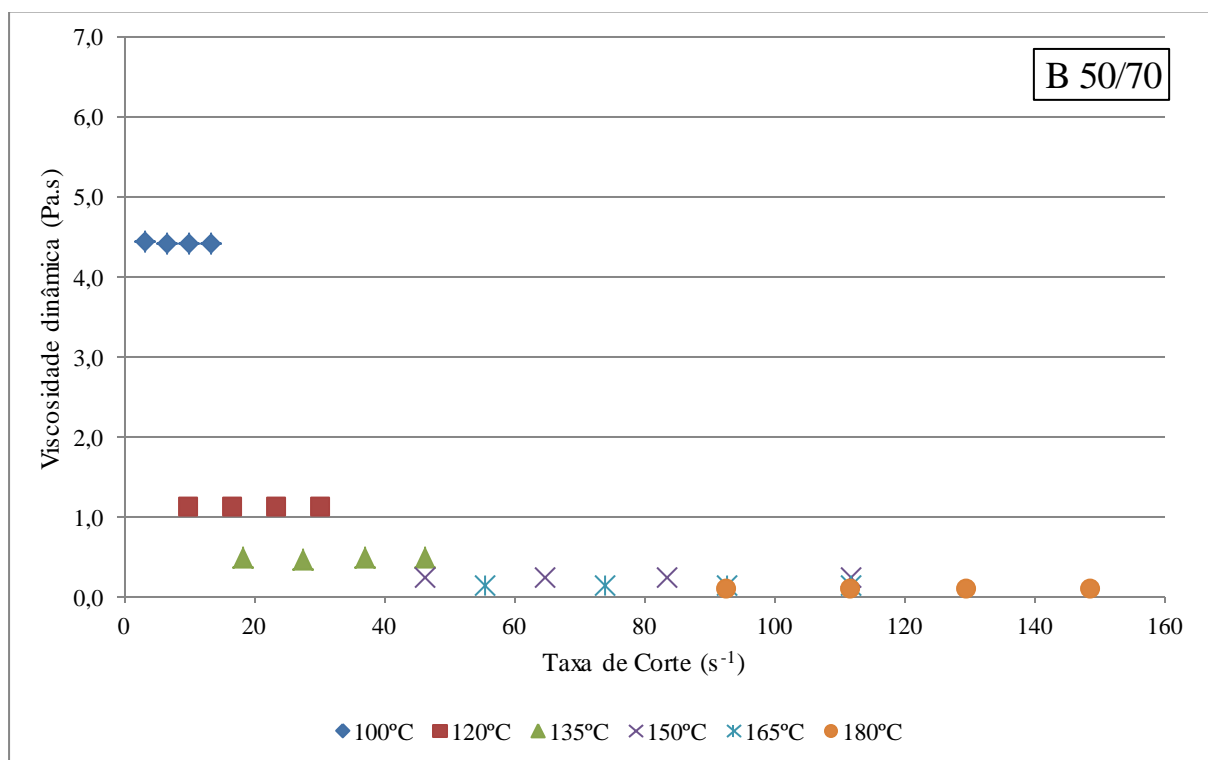


Figura A.2 – Viscosidade dinâmica do betume B 50/70, para várias temperaturas e taxas de corte.

Anexo B – Caracterização do comportamento reológico dos betumes modificados

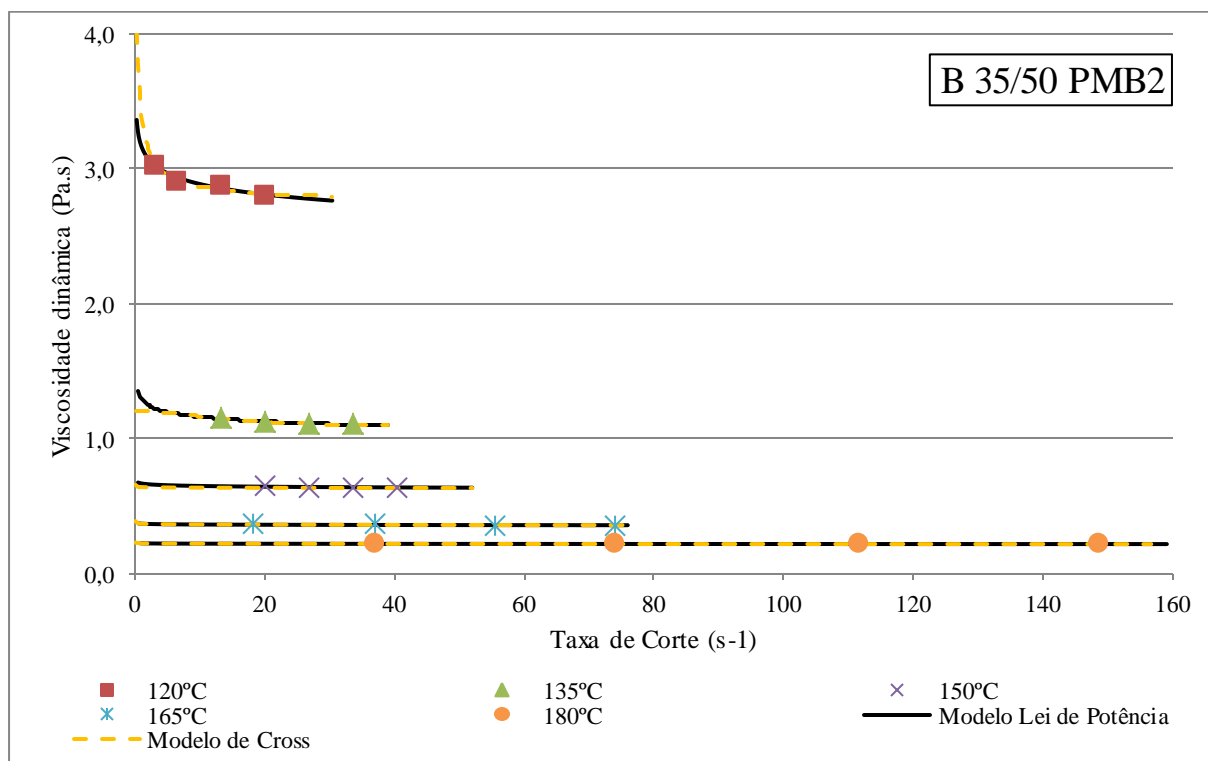


Figura B.1 – Viscosidade dinâmica do betume B 35/50 PMB2, para várias temperaturas e taxas de corte.

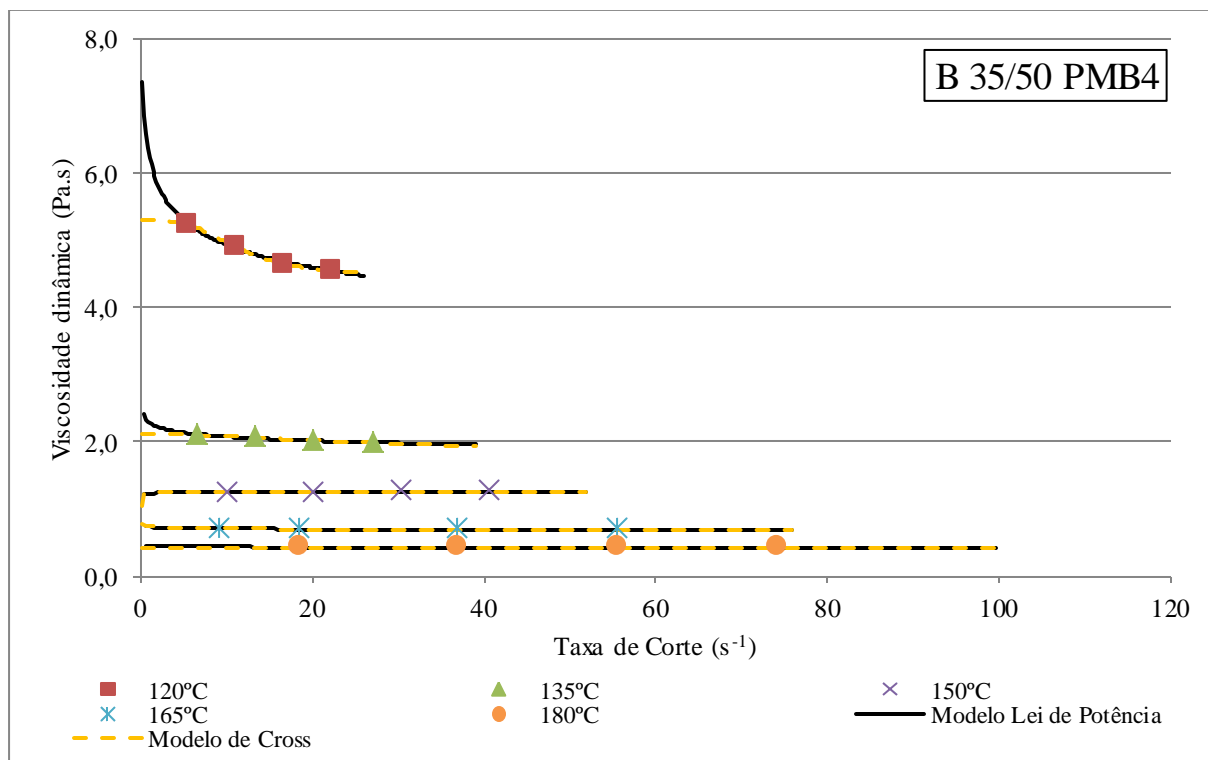


Figura B.2 – Viscosidade dinâmica do betume B 35/50 PMB4, para várias temperaturas e taxas de corte.

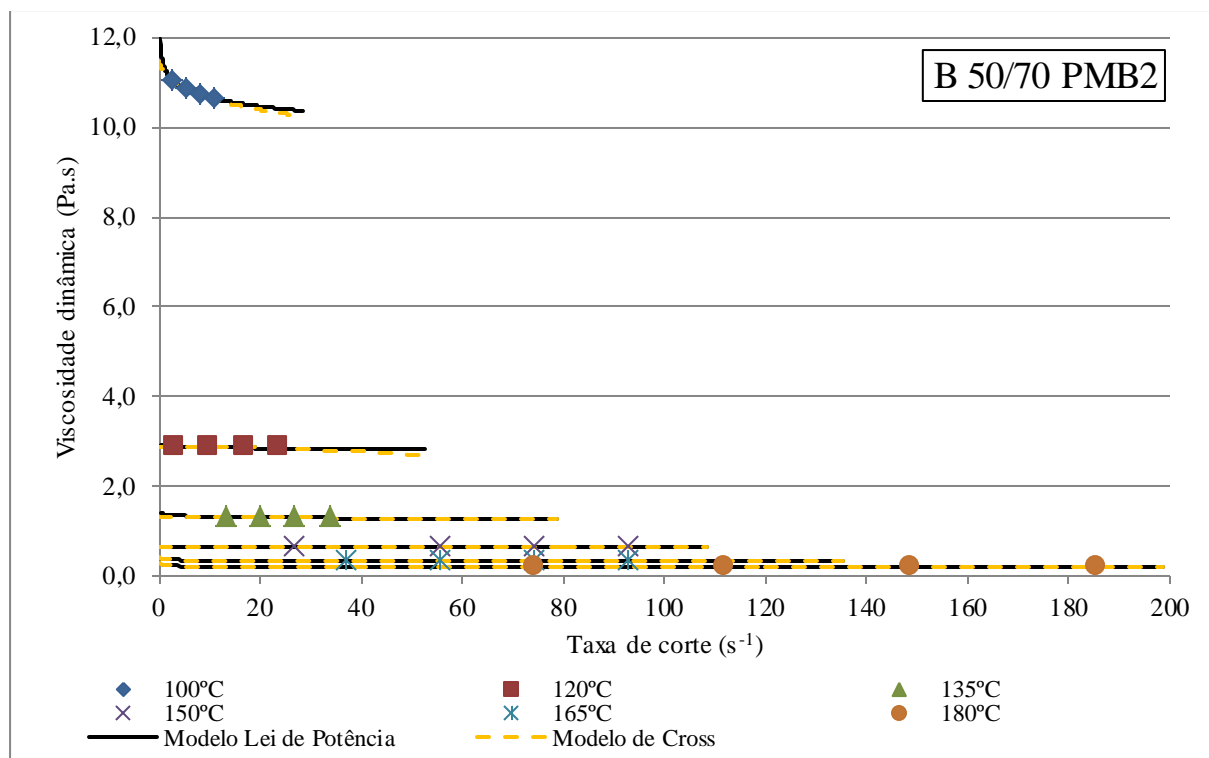


Figura B.3 – Viscosidade dinâmica do betume B 50/70 PMB2, para várias temperaturas e taxas de corte.

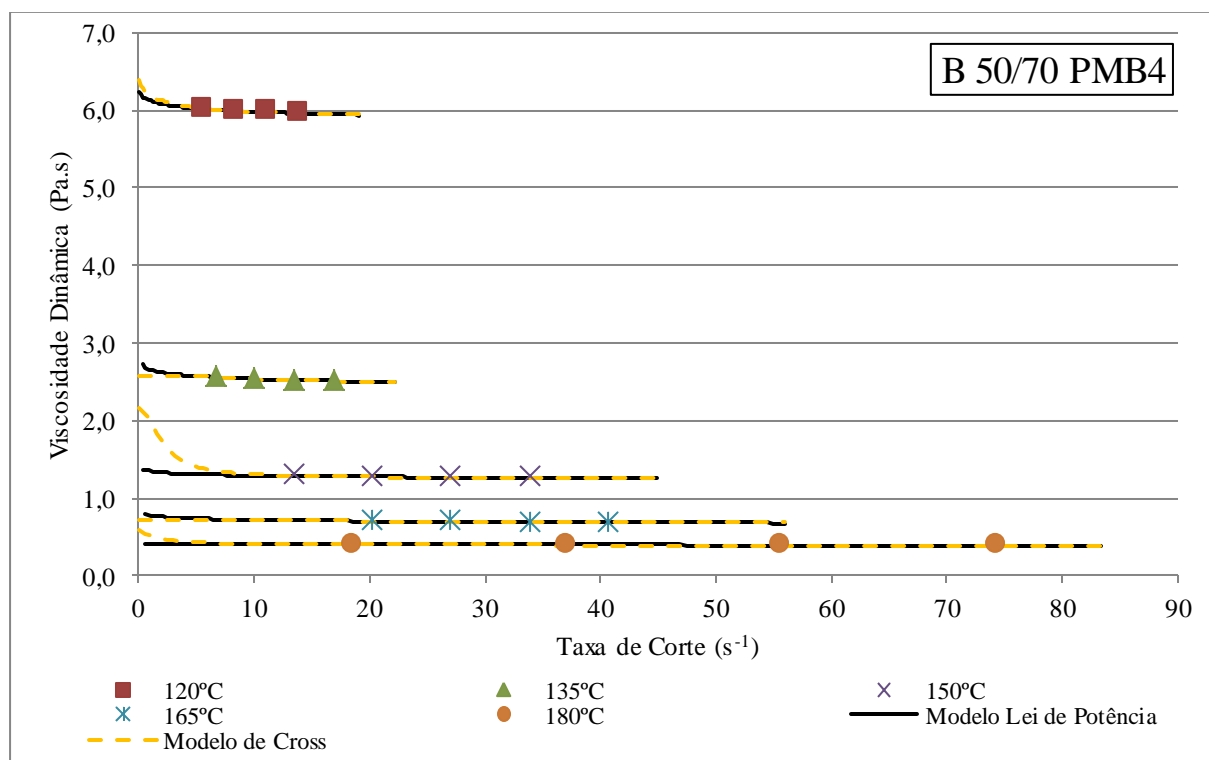


Figura B.4 – Viscosidade dinâmica do betume B 50/70 PMB4, para várias temperaturas e taxas de corte.

Quadro B.1 – Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os betumes modificados da classe 35/50.

Betume	T (°C)	Método de Cross			
		m	K	n_{∞}	n_o
B 35/50 PMB2	100	-	-	-	-
	120	0,745	6,5046	2,7372	5,8865
	135	2,0096	0,0695	1,0868	1,2037
	150	0,1455	0,03408	0,6127	0,6682
	165	0,1794	0,0398	0,3359	0,3893
	180	0,2091	0,0062	0,2075	0,2304
B 35/50 PMB4	100	-	-	-	-
	120	3,3005	0,08931	4,4711	5,2982
	135	2,0713	0,0435	1,8814	2,1175
	150	0,05111	0,01902	1,4821	1,0282
	165	0,5175	0,1727	0,66096	0,7656
	180	3,0897	0,02803	0,4186	0,4315

Quadro B.2 – Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os betumes modificados da classe 50/70.

Betume	T (°C)	Modelo de Cross			
		m	K	n_{∞}	n_o
B 50/70 PMB2	100	0,6187	0,02705	8,80079	11,4741
	120	2,6112	0,01551	2,405	2,875
	135	4,4436	0,0434	1,2888	1,317
	150	7,5359	0,014996	0,6274	0,6366
	165	0,2674	0,1607	0,2661	0,4437
	180	0,2102	0,0148	0,1171	0,2802
B 50/70 PMB4	100	-	-	-	-
	120	0,8658	0,6232	5,8979	6,3847
	135	2,6439	0,0989	2,4934	2,5786
	150	1,8862	0,4784	1,2621	2,1529
	165	5,4174	0,0384	0,6875	0,7098
	180	1,3331	0,6216	0,3945	0,594

Quadro B.3 - Equações do modelo da Lei de Potência para os betumes modificados.

Betume	Temperatura	Modelo Lei de Potência
B 35/50 PMB2	120	$\eta = 3,1591\dot{\gamma}^{-0,039}$
	135	$\eta = 1,2839\dot{\gamma}^{-0,043}$
	150	$\eta = 0,6684\dot{\gamma}^{-0,012}$
	165	$\eta = 0,3704\dot{\gamma}^{-0,007}$
	180	$\eta = 0,2251\dot{\gamma}^{-0,005}$
B 35/50 PMB4	120	$\eta = 6,2309\dot{\gamma}^{-0,102}$
	135	$\eta = 2,2843\dot{\gamma}^{-0,042}$
	150	$\eta = 1,2323\dot{\gamma}^{-0,0046}$
	165	$\eta = 0,7338\dot{\gamma}^{-0,017}$
	180	$\eta = 0,4528\dot{\gamma}^{-0,018}$
B 50/70 PMB2	100	$\eta = 11,348\dot{\gamma}^{-0,027}$
	120	$\eta = 2,8971\dot{\gamma}^{-0,005}$
	135	$\eta = 1,3799\dot{\gamma}^{-0,018}$
	150	$\eta = 0,6612\dot{\gamma}^{-0,011}$
	165	$\eta = 0,3766\dot{\gamma}^{-0,033}$
	180	$\eta = 0,2394\dot{\gamma}^{-0,044}$
B 50/70 PMB4	120	$\eta = 6,1317\dot{\gamma}^{-0,011}$
	135	$\eta = 2,6559\dot{\gamma}^{-0,02}$
	150	$\eta = 1,3474\dot{\gamma}^{-0,018}$
	165	$\eta = 0,7802\dot{\gamma}^{-0,034}$
	180	$\eta = 0,4149\dot{\gamma}^{-0,011}$

Anexo C – Caracterização do comportamento reológico dos mastiques betuminosos

Quadro C.1 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC480 (método A).

B 35/50 + RC480											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	45,8125	1,4	10,2000	5,6	4,3656	11,22	1,9739	10,2	1,0228	20,4	0,6255
1,4	45,4000	2,8	10,0994	8,4	4,2603	16,8	1,9415	17	1,0025	40,8	0,6024
2,8	44,3500	5,6	10,0750	11,2	4,1315	22,4	1,9153	23,8	0,9790	54,4	0,5830
-	-	8,4	9,9645	14,0	4,0688	28	1,8931	30,6	0,9549	-	-

Quadro C.2 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC590 (método A).

B 35/50 + RC590											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	55,4375	1,4	11,8125	5,6	5,2094	11,2	2,4794	10,2	1,4323	20,4	0,8500
1,4	54,6875	2,8	11,7875	8,4	5,0895	14	2,4525	17	1,3919	40,8	0,8365
-	-	5,6	11,6781	11,2	5,0408	16,8	2,4230	23,8	1,3691	54,4	0,8225
-	-	8,4	11,6271	14,0	4,9925	19,6	2,3946	30,6	1,3235	68,8	0,8103

Quadro C.3 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + Cal-NHL5 (método A).

35/50 B + Cal-NHL5											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	94,4688	1,4	19,0375	2,8	7,8000	5,6	3,4250	10,2	1,6385	13,6	0,9610
1,4	87,3375	2,8	18,2938	5,6	7,4125	11,2	3,2610	17	1,5906	34,0	0,9116
-	-	5,6	17,8000	8,4	7,1439	16,8	3,1875	23,8	1,5686	51,0	0,8969
-	-	-	-	11,2	6,9798	22,4	3,1588	30,6	1,5591	-	-

Quadro C.4 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC480 (método A).

B 35/50 PMB2 + RC480									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	25,7188	2,8	7,8938	5,6	4,1344	6,8	1,9948	13,6	1,1273
1,4	21,9375	5,6	7,6219	11,2	3,9656	13,6	1,9256	27,2	1,1026
2,8	20,0500	8,4	7,4833	16,8	3,8866	20,4	1,8939	40,8	1,0845
5,6	18,7500	11,2	7,3514	22,4	3,8201	27,2	1,8810	54,4	1,0673

Quadro C.5 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC590 (método A).

B 35/50 PMB2 + RC590									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	31,8125	2,8	9,7438	5,6	4,7594	6,8	2,3019	13,6	1,4925
1,4	26,5500	5,6	9,0094	11,2	4,3658	13,6	2,2476	27,2	1,4648
2,8	23,7875	8,4	8,6480	16,8	4,2365	20,4	2,2324	40,8	1,4375
5,6	21,8250	11,2	8,4346	22,4	4,1780	27,2	2,2151	54,4	1,4131

Quadro C.6 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5 (método A).

B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	127,6250	0,56	52,5000	2,8	8,2250	5,6	3,6031	6,8	1,9810
1,4	78,1625	1,4	32,6375	5,6	7,4875	11,2	3,5220	20,4	1,8840
-	-	2,8	23,3675	8,4	7,1083	16,8	3,4854	34,0	1,8439
-	-	5,6	18,0531	11,2	6,8625	22,4	3,4008	45,9	1,8251

Quadro C.7 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4 + RC480 (método A).

B 35/50 PMB4 + RC480									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	123,8750	0,56	40,2500	1,4	11,0000	5,6	3,9938	11,2	2,1893
1,4	83,0125	1,4	28,1250	2,8	10,6125	11,2	3,9359	19,6	2,1722
-	-	2,8	22,6375	5,6	9,9188	16,8	3,9074	28,0	2,1556
-	-	5,6	20,3688	8,4	9,5311	22,4	3,8228	37,8	2,1235

Quadro C.8 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4 + RC590 (método A).

35/50 M4 + RC590									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	106,7500	0,56	49,3438	2,8	12,2688	5,6	4,6469	11,2	2,4516
1,4	72,8000	1,4	34,6250	5,6	11,2844	11,2	4,5720	19,6	2,4233
-	-	2,8	27,5688	8,4	10,6769	16,8	4,5415	28,0	2,4006
-	-	5,6	23,2156	11,2	10,2594	22,4	4,5103	37,8	2,3836

Quadro C.9 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5 (método A).

B 35/50 PMB4 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
-	-	-	-	0,56	93,1563	1,4	13,2625	5,6	4,4938
-	-	-	-	1,4	61,6125	2,8	11,4438	11,2	4,3688
-	-	-	-	-	-	5,6	10,1469	16,8	4,2896
-	-	-	-	-	-	8,4	9,5480	22,4	4,2086

Quadro C.10 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC480 (método A).

B 50/70 + RC480											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	30,2188	2,8	7,1625	11,2	3,0750	6,8	1,5795	13,6	0,8297	20,4	0,4474
1,4	30,0625	5,6	7,0844	16,8	3,0385	13,6	1,5110	23,8	0,8201	34,0	0,4313
2,8	29,3938	8,4	7,0311	22,4	3,0033	20,4	1,4765	34	0,8025	47,6	0,4166
-	-	11,2	6,9908	28,0	2,9856	27,2	1,4558	45,9	0,7843	61,2	0,4071

Quadro C.11 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC590 (método A).

B 50/70 + RC590											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	36,3125	2,8	8,3500	11,2	3,5299	22,4	1,8875	13,6	1,0459	27,2	0,6461
1,4	35,9250	5,6	8,2563	16,8	3,5061	33,6	1,8625	20,4	1,0329	40,8	0,6334
2,8	35,5748	8,4	8,1708	22,4	3,4931	44,8	1,8341	27,2	1,0210	54,4	0,6197
-	-	11,2	8,1268	28,0	3,4644	56	1,8086	34,0	1,0109	68,0	0,6066

Quadro C.12 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + Cal-NHL5 (método A).

B 50/70 + NHL5											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	67,4375	2,8	14,2188	2,8	5,6813	5,6	2,6094	16,8	1,3425	13,6	0,8235
1,4	63,7000	5,6	13,5625	5,6	5,5185	11,2	2,5331	28	1,3175	27,2	0,7766
-	-	8,4	13,2920	8,4	5,4920	16,8	2,5091	39,2	1,3020	40,8	0,7612
-	-	-	-	11,2	5,4250	22,4	2,4763	50,4	1,2945	54,4	0,7512

Quadro C.13 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC480 (método A).

B 50/70 PMB2 + RC480											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	69,6563	1,4	14,2625	5,6	5,2875	11,2	2,5855	13,6	1,3961	20,4	0,8125
1,4	64,5250	2,8	13,9125	11,2	5,2285	16,8	2,5635	20,4	1,3870	34,0	0,7969
-	-	5,6	13,4063	16,8	5,1760	22,4	2,5376	27,2	1,3709	47,6	0,7822
-	-	8,4	13,0959	22,4	5,1196	28	2,5181	34,0	1,3580	61,2	0,7695

Quadro C.14 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC590 (método A).

B 50/70 PMB2 + RC590											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	86,7188	1,4	16,3125	5,6	6,2938	11,2	3,0610	13,6	1,6458	20,4	0,9469
1,4	82,1500	2,8	16,2499	11,2	6,2169	16,8	3,0416	20,4	1,6270	34,0	0,9263
-	-	5,6	15,8219	16,8	6,1511	22,4	3,0183	27,2	1,6110	47,6	0,9165
-	-	8,4	15,3708	22,4	6,0828	28	2,9963	34,0	1,6024	61,2	0,9037

Quadro C.15 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + Cal-NHL5 (método A).

B 50/70 PMB2 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	29,1563	2,8	9,4250	11,2	4,1671	6,8	2,2485	13,6	1,3023
1,4	27,0625	5,6	9,0313	14	4,0763	13,6	2,2180	20,4	1,2721
2,8	24,6563	8,4	8,8896	16,8	4,0364	20,4	2,1779	27,2	1,2480
5,6	23,3125	11,2	8,8594	19,6	3,9895	27,2	2,1538	34,0	1,2284

Quadro C.16 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC480 (método A).

B 50/70 PMB4 + RC480									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	33,5625	2,8	9,9875	5,6	4,1750	11,2	2,2565	22,4	1,4060
1,4	32,8750	5,6	9,6250	11,2	4,1620	22,4	2,2340	28	1,3975
2,8	31,0375	8,4	9,4370	16,8	4,1418	33,6	2,2220	33,6	1,3870
-	-	11,2	9,3003	22,4	4,1250	39,2	2,2015	39,2	1,3805

Quadro C.17 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC590 (método A).

B 50/70 PMB4 + RC590									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	39,3125	1,4	12,2000	5,6	5,1375	11,2	2,7190	22,4	1,5630
1,4	38,4750	2,8	11,8000	11,2	4,9470	16,8	2,6853	28	1,5513
2,8	37,5375	5,6	11,3188	16,8	4,8980	22,4	2,6670	33,6	1,5378
-	-	8,4	10,9585	22,4	4,8643	28	2,6613	39,2	1,5320

Quadro C.18 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + Cal-NHL5 (método A).

B 50/70 PMB4 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	49,9844	1,4	19,9500	2,8	8,6563	5,6	4,2125	16,8	2,3500
1,4	41,1375	2,8	18,7313	5,6	8,0344	11,2	4,0908	22,4	2,3205
-	-	5,6	17,7344	8,4	7,8396	16,8	4,0750	28	2,3013
-	-	-	-	11,2	7,7674	22,4	4,0438	33,6	2,2800

Quadro C.19 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC480 (método B).

B 35/50 + RC480											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
1,4	19,5875	5,6	4,5625	11,2	1,9223	13,6	0,9102	20,4	0,4703	30,6	0,2830
2,8	19,5313	8,4	4,5458	16,8	1,9085	20,4	0,8948	30,6	0,4653	45,9	0,2729
5,6	19,4063	11,2	4,5200	22,4	1,9035	27,2	0,8883	40,8	0,4594	54,4	0,2641
-	-	14	4,5088	28	1,8913	34	0,8809	51	0,4531	68	0,2552

Quadro C.20 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + RC590 (método B).

B 35/50 + RC590											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	27,0625	5,6	5,5969	8,4	2,3186	10,2	1,0530	17	0,5825	27,2	0,3422
1,4	27,0000	8,4	5,5771	14	2,2975	17	1,0344	27,2	0,5630	40,8	0,3229
2,8	26,8000	11,2	5,5389	19,6	2,2834	23,8	1,0167	40,8	0,5485	54,4	0,3073
-	-	14	5,5138	25,2	2,2646	30,6	1,0025	51	0,5356	68	0,2907

Quadro C.21 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 + Cal-NHL5 (método B).

B 35/50 + Cal-NHL5											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	27,0625	5,6	5,5969	8,4	2,3186	10,2	1,0530	17	0,5825	27,2	0,3422
1,4	27,0000	8,4	5,5771	14	2,2975	17	1,0344	27,2	0,5630	40,8	0,3229
2,8	26,8000	11,2	5,5389	19,6	2,2834	23,8	1,0167	40,8	0,5485	54,4	0,3073
-	-	14	5,5138	25,2	2,2646	30,6	1,0025	51	0,5356	68	0,2907

Quadro C.22 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC480 (método B).

B 35/50 PMB2 + RC480									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	11,2750	5,6	4,1563	16,8	2,1690	13,6	1,0825	20,4	0,6177
2,8	10,2938	11,2	4,0861	22,4	2,1575	20,4	1,0633	30,6	0,6042
5,6	9,7310	16,8	4,0281	28	2,1338	27,2	1,0493	40,8	0,5891
8,4	9,4270	22,4	3,9935	33,6	2,1100	34	1,0340	51	0,5763

Quadro C.23 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + RC590 (método B).

B 35/50 PMB2 + RC590									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	12,1000	5,6	4,6250	16,8	2,3750	13,6	1,1470	20,4	0,6844
2,8	11,1813	11,2	4,5440	22,4	2,2325	20,4	1,1395	34	0,6706
5,6	10,6750	16,8	4,5073	28	2,2206	27,2	1,1334	47,6	0,6587
8,4	10,3374	22,4	4,4798	33,6	2,1973	34	1,1199	61,2	0,6473

Quadro C.24 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5 (método B).

B 35/50 PMB2 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	53,1563	1,4	12,3125	5,6	3,7219	6,8	1,7120	13,6	0,9945
1,4	33,9625	2,8	10,1100	11,2	3,4285	13,6	1,6619	27,2	0,9602
2,8	25,1188	5,6	8,5250	16,8	3,2533	20,4	1,6280	40,8	0,9414
5,6	19,5188	8,4	7,6918	22,4	3,1180	27,2	1,6064	54,4	0,9319

Quadro C.25 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4+ RC480 (método B).

B 35/50 PMB4 + RC480									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	23,0750	2,8	8,3875	5,6	5,5750	11,2	2,5769	22,4	1,3623
2,8	20,2750	5,6	7,8438	11,2	5,3610	16,8	2,5230	28	1,3344
5,6	18,8938	8,4	7,7585	16,8	5,1979	22,4	2,5008	39,2	1,3049
-	-	11,2	7,6268	22,4	5,0750	28	2,4654	50,4	1,2773

Quadro C.26 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4+ RC590 (método B).

B 35/50 PMB4 + RC590									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	25,1000	2,8	8,6875	5,6	5,9438	11,2	2,7005	22,4	1,4360
2,8	22,4500	5,6	8,1688	11,2	5,6344	16,8	2,6436	33,6	1,4170
5,6	21,1094	8,4	7,9814	16,8	5,5375	22,4	2,6031	44,8	1,3994
-	-	11,2	7,9500	22,4	5,3845	28	2,5750	56	1,3886

Quadro C.27 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 35/50 PMB4+ Cal-NHL5 (método B).

B 35/50 PMB4 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	93,1250	0,56	53,0000	1,4	13,5000	5,6	3,9906	16,8	1,9584
1,4	60,4500	1,4	32,8375	2,8	10,9063	11,2	3,6109	28	1,8881
-	-	2,8	23,6188	5,6	9,0000	16,8	3,4958	39,2	1,8401
-	-	5,6	17,8593	8,4	8,0040	22,4	3,4016	50,4	1,8015

Quadro C.28 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC480 (método B).

B 50/70+ RC480											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
1,4	15,7125	5,6	3,8313	11,2	1,6580	13,6	0,8766	20,4	0,4292	34	0,2478
2,8	15,5750	8,4	3,7915	16,8	1,6489	20,4	0,8490	27,2	0,4157	40,8	0,2367
5,6	15,3844	11,2	3,7575	22,4	1,6375	27,2	0,8367	34	0,4066	47,6	0,2270
8,4	15,2561	14	3,7400	28	1,6250	34	0,8247	40,8	0,3969	54,4	0,2172

Quadro C.29 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + RC590 (método B).

B 50/70 + RC590											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
1,4	18,2000	5,6	4,5500	11,2	2,1625	13,6	0,8469	27,2	0,4500	40,8	0,2641
2,8	18,0375	8,4	4,4878	16,8	2,1064	20,4	0,8412	34	0,4441	47,6	0,2587
5,6	17,8625	11,2	4,4453	22,4	2,0898	27,2	0,8285	40,8	0,4380	54,4	0,2532
-	-	14	4,4338	28	2,0781	34	0,8209	47,6	0,4315	61,2	0,2471

Quadro C.30 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 + Cal-NHL5 (método B).

B 50/70 + Cal-NHL5											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	27,3125	2,8	6,3313	8,4	2,6314	16,8	1,2790	13,6	0,6907	27,2	0,4075
1,4	27,1000	5,6	6,2469	14	2,5925	22,4	1,2720	20,4	0,6719	40,8	0,3858
2,8	26,5500	8,4	6,2148	19,6	2,5510	28	1,2550	27,2	0,6594	54,4	0,3679
-	-	11,2	6,1950	25,2	2,5378	33,6	1,2435	34	0,6447	68	0,3555

Quadro C.31 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC480 (método B).

B 50/70 PMB2 + RC480											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	36,5313	2,8	7,5500	5,6	3,2406	11,2	1,5810	13,6	0,8899	20,4	0,4589
1,4	33,6875	5,6	7,4344	11,2	3,1955	16,8	1,5805	20,4	0,8765	34	0,4541
2,8	32,5750	8,4	7,3520	16,8	3,1676	22,4	1,5708	27,2	0,8672	47,6	0,4447
-	-	11,2	7,3031	22,4	3,1508	28	1,5605	34	0,8641	61,2	0,4320

Quadro C.32 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + RC590 (método B).

B 50/70 PMB2 + RC590											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	37,8438	2,8	8,2375	5,6	3,5688	16,8	1,6730	13,6	0,9391	27,2	0,5285
1,4	34,5750	5,6	8,1094	11,2	3,4189	22,4	1,6546	20,4	0,9198	40,8	0,5193
2,8	33,2688	8,4	7,9959	16,8	3,3719	28	1,6388	27,2	0,9082	54,4	0,5127
-	-	11,2	7,8891	22,4	3,3448	33,6	1,6326	34	0,9009	68	0,5071

Quadro C.33 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB2 + Cal-NHL5 (método B).

B 50/70 PMB2 + Cal-NHL5											
Temperaturas (°C)											
100		120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (Pa.s)
0,56	83,0625	1,4	14,4000	5,6	5,0500	11,2	2,5343	6,8	1,3234	13,6	0,8000
1,4	68,9250	2,8	13,7438	11,2	5,0080	16,8	2,4690	13,6	1,2970	20,4	0,7703
-	-	5,6	13,0156	16,8	4,9760	22,4	2,4503	20,4	1,2651	27,2	0,7500
-	-	8,4	12,6604	22,4	4,9454	28	2,4269	27,2	1,2481	34	0,7331

Quadro C.34 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC480 (método B).

B 50/70 PMB4 + RC480									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	16,1750	5,6	5,4563	11,2	2,4565	22,4	1,3220	27,2	0,7610
2,8	15,9625	8,4	5,3458	16,8	2,4420	33,6	1,3190	40,8	0,7516
5,6	15,3125	11,2	5,2903	22,4	2,4328	44,8	1,3060	54,4	0,7430
8,4	14,7460	14	5,2550	28	2,4200	56	1,2965	68	0,7381

Quadro C.35 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70 PMB4 + RC590 (método B).

B 35/50 PMB4 + RC590									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
1,4	18,8500	2,8	6,4870	11,2	2,6653	22,4	1,4440	27,2	0,8273
2,8	18,6375	5,6	6,1813	16,8	2,6333	33,6	1,4250	40,8	0,8167
5,6	17,7875	8,4	6,0543	22,4	2,6170	44,8	1,4153	54,4	0,8137
-	-	11,2	5,9218	28	2,5913	56	1,4103	68	0,8113

Quadro C.36 – Viscosidade dinâmica para diferentes temperaturas e taxas de corte para o mastique B 50/70
PMB4 + Cal-NHL5 (método B).

B 35/50 PMB4 + Cal-NHL5									
Temperaturas (°C)									
120		135		150		165		180	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	η (Pa.s)
0,56	34,2500	2,8	9,1500	11,2	3,8345	22,4	2,0880	20,4	1,1895
1,4	30,7000	5,6	8,7060	16,8	3,8040	28	2,0713	27,2	1,1720
2,8	27,5500	8,4	8,4750	22,4	3,7690	33,6	2,0590	34	1,1623
-	-	11,2	8,3530	28	3,7550	39,2	2,0538	40,8	1,1490

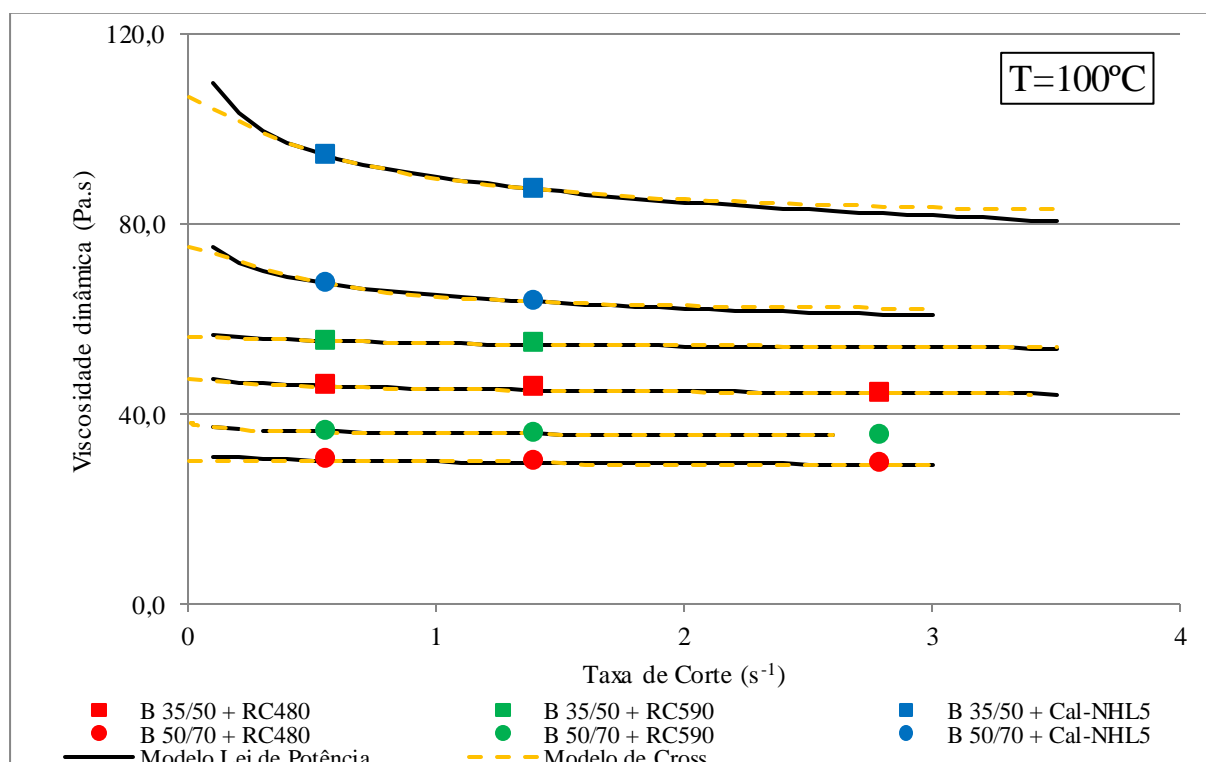


Figura C.1 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 100°C para várias taxas de corte (Método A).

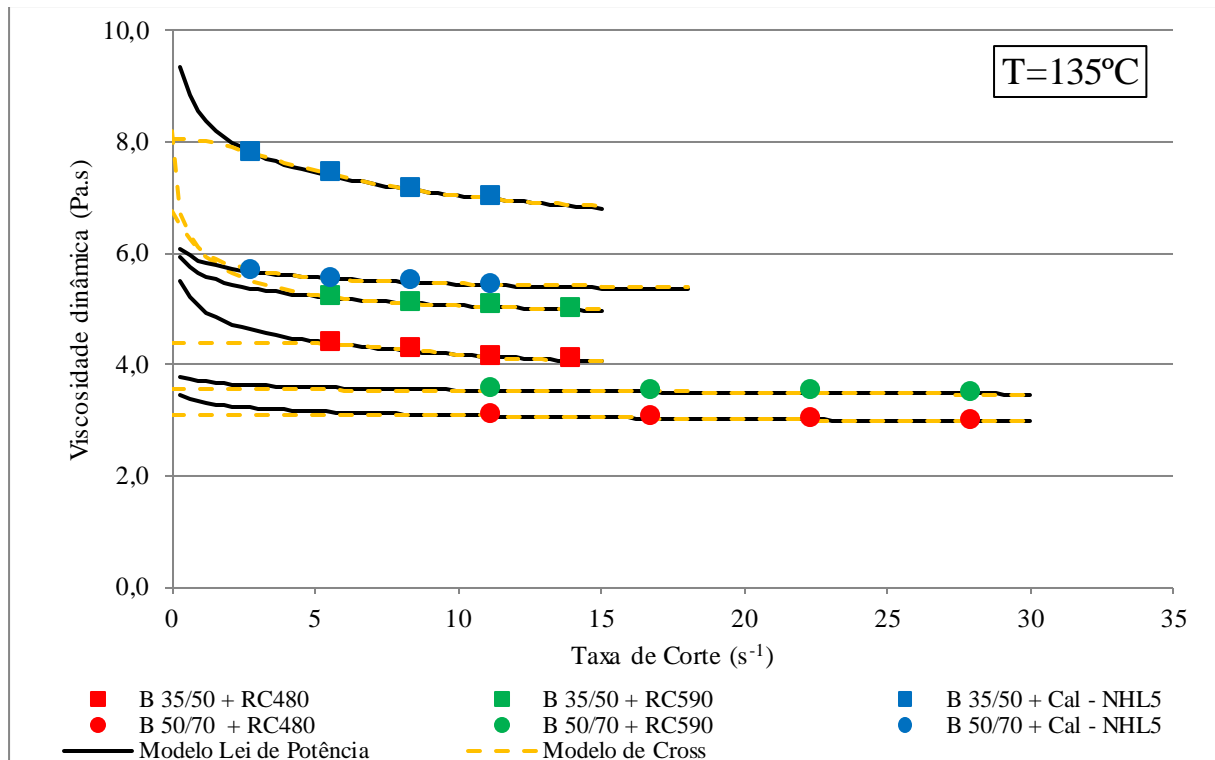


Figura C.2 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método A).

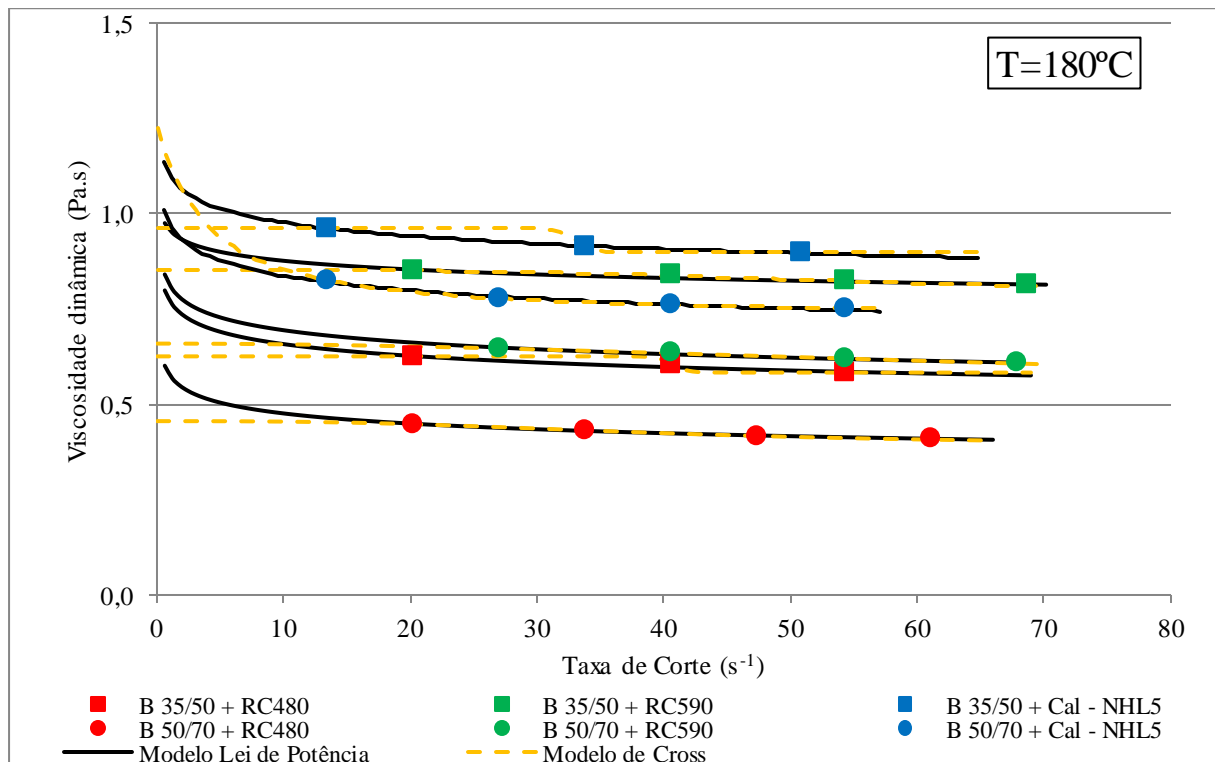


Figura C.3 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método A).

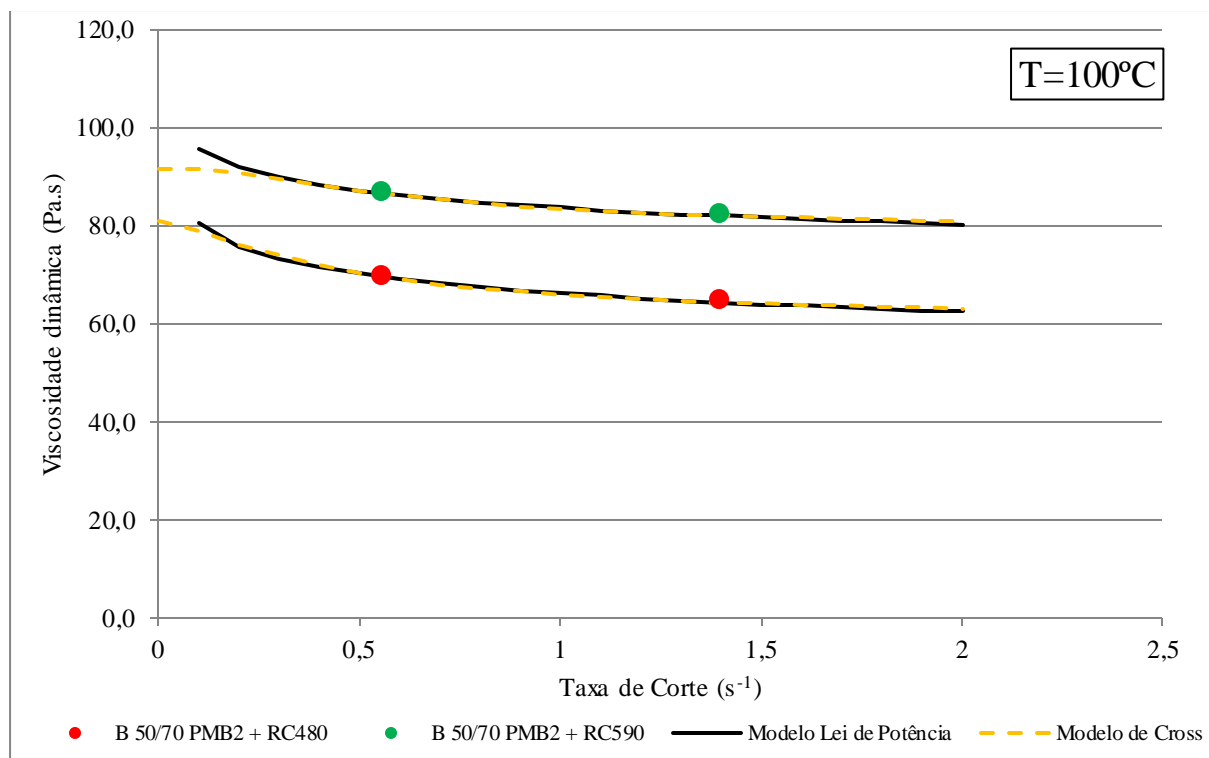


Figura C.4 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 100°C para várias taxas de corte (Método A).

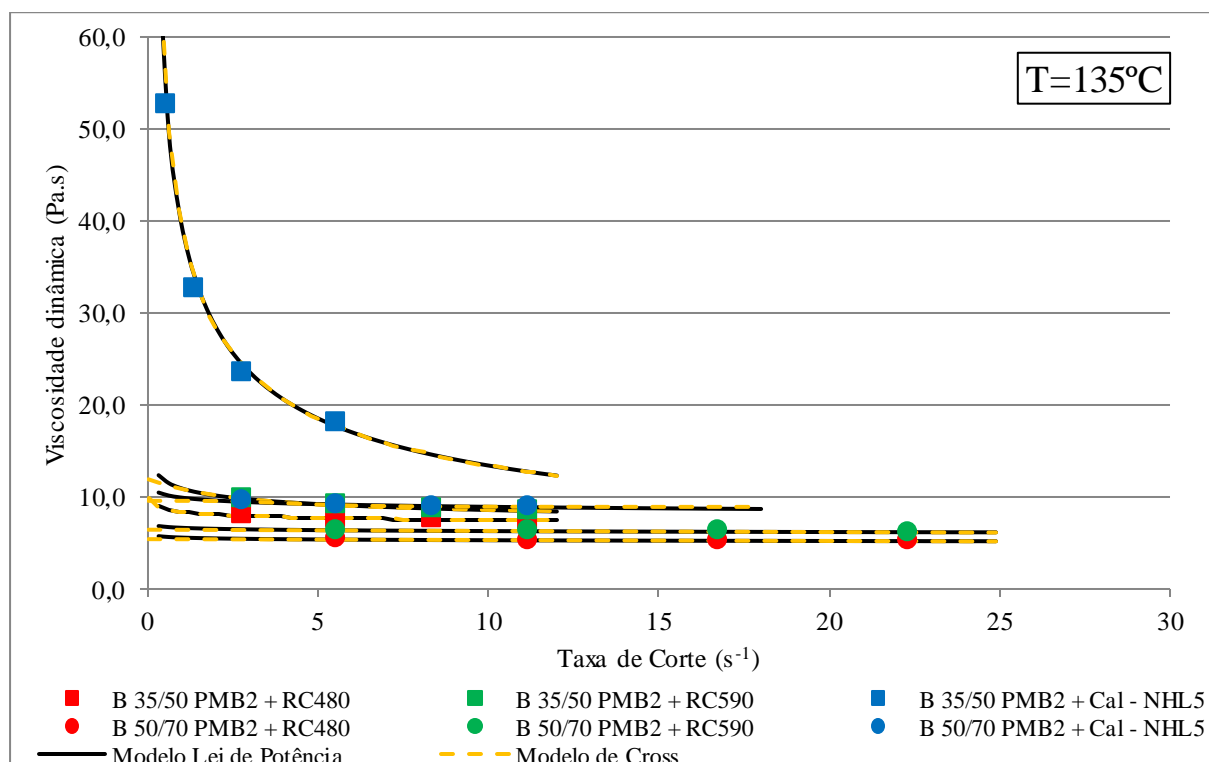


Figura C.5 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método A).

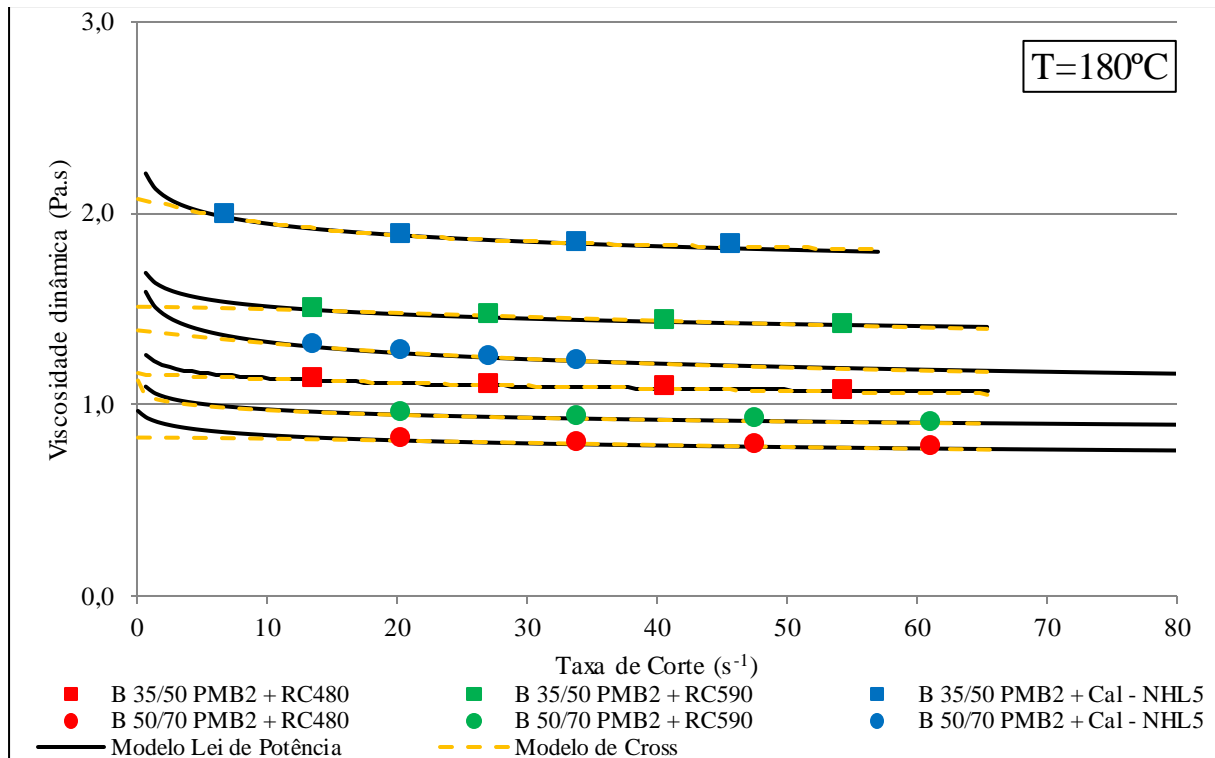


Figura C.6 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método A).

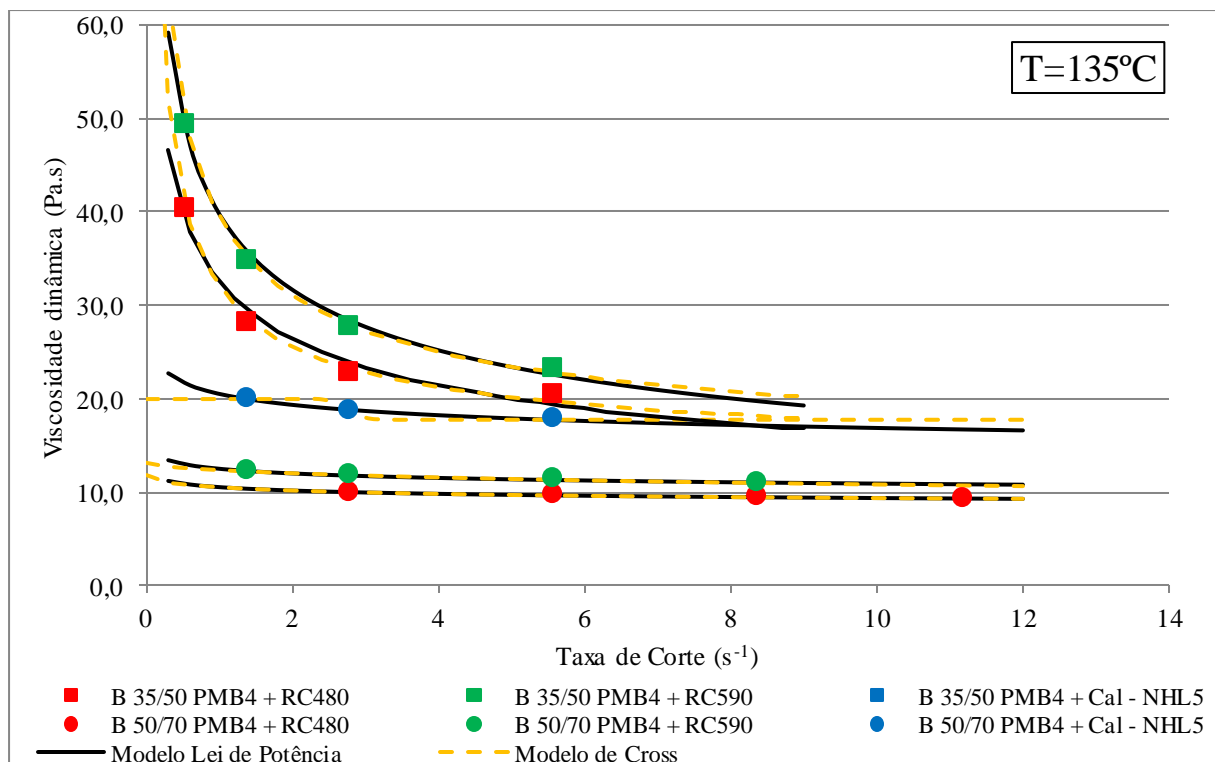


Figura C.7 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método A).

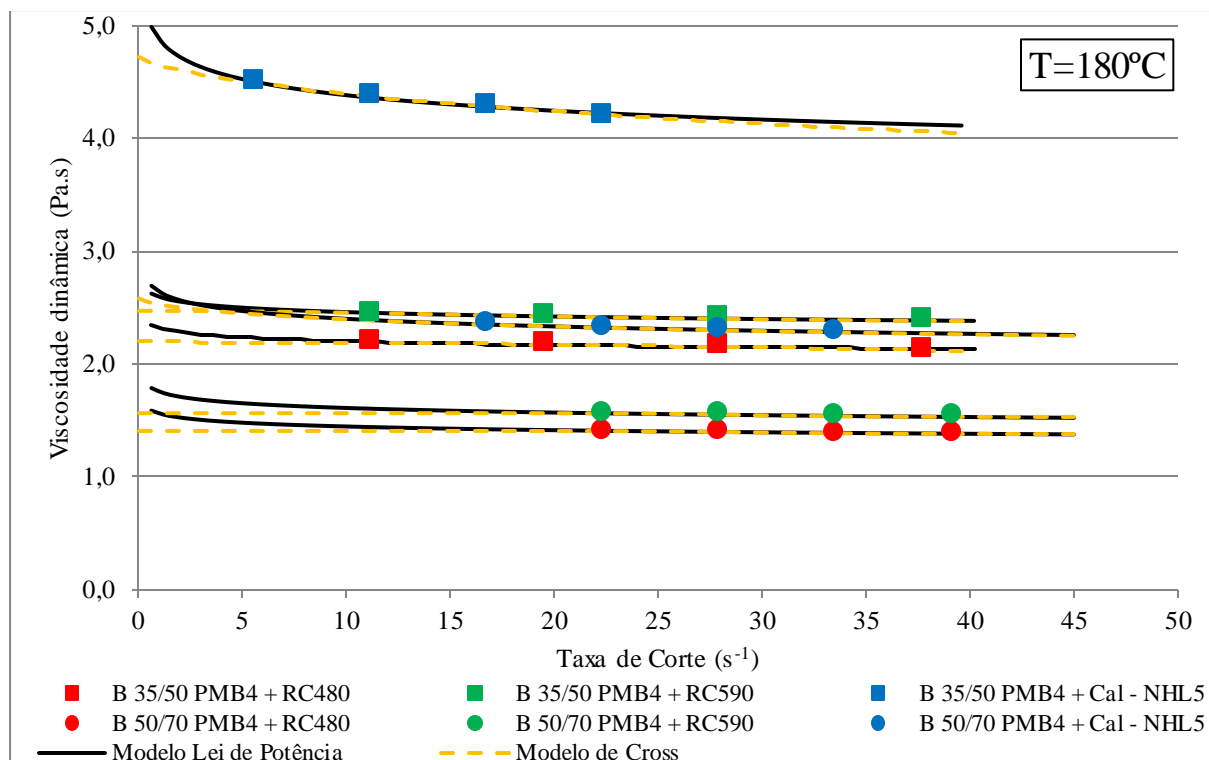


Figura C.8 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método A).

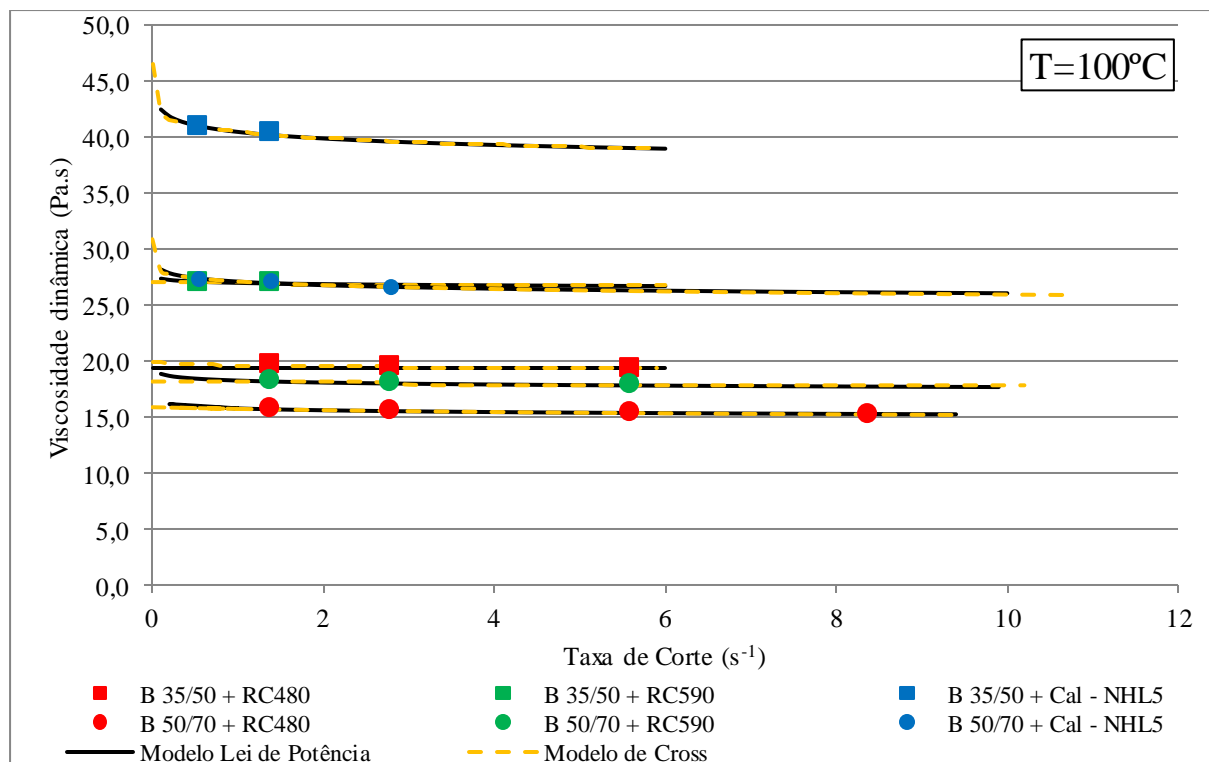


Figura C.9 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de 100°C para várias taxas de corte (Método B).

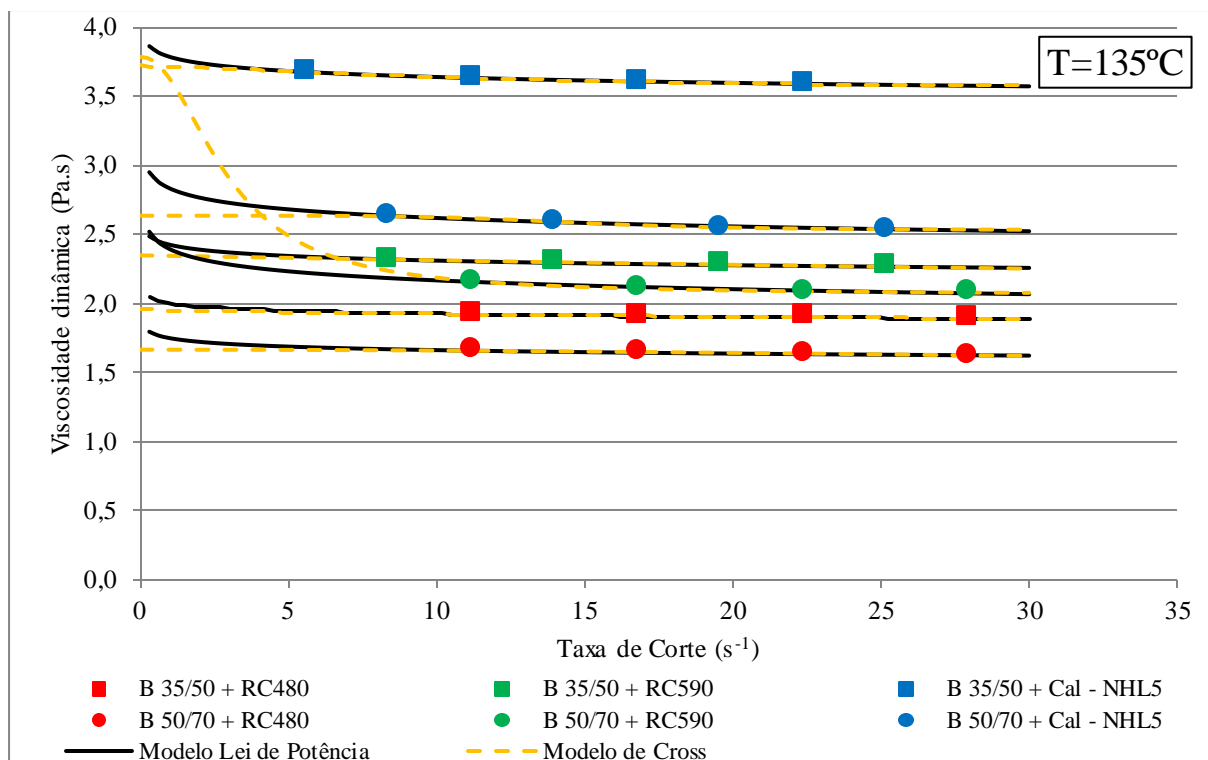


Figura C.10 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de $135^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

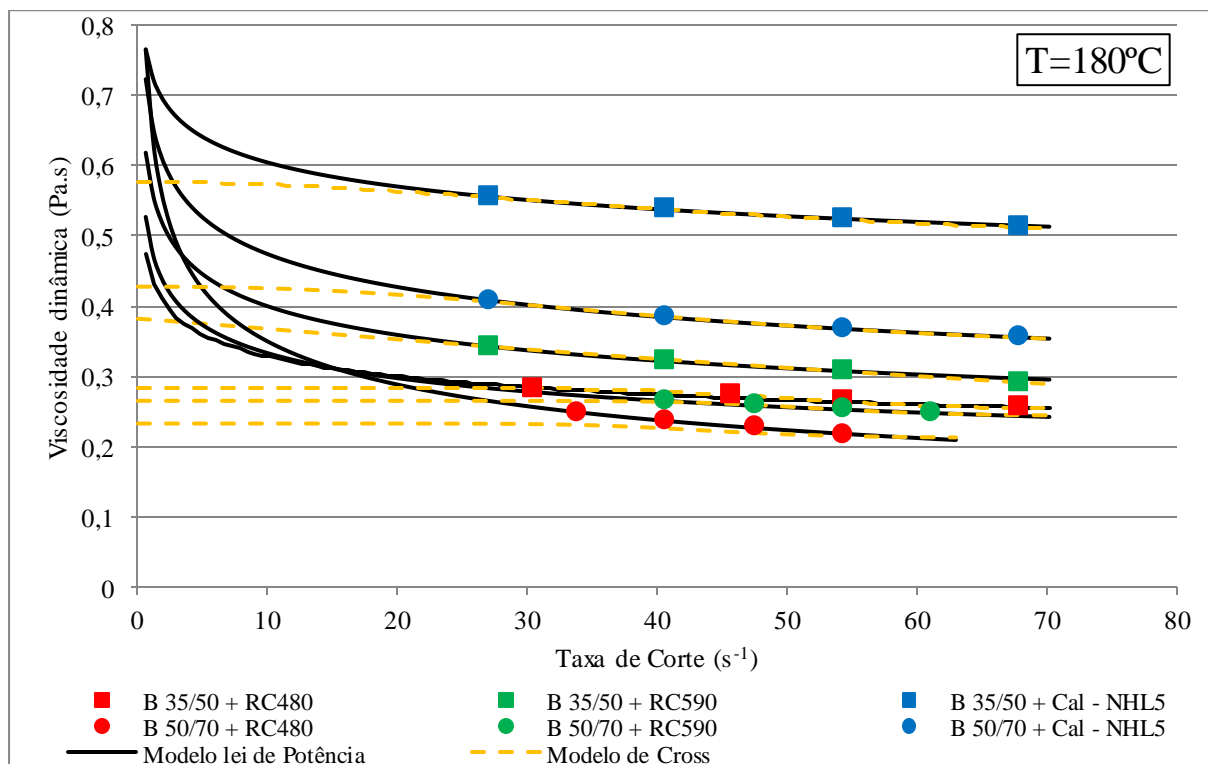


Figura C.11 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 e B50/70, a uma temperatura de $180^{\circ}C$ para várias taxas de corte (Método B).

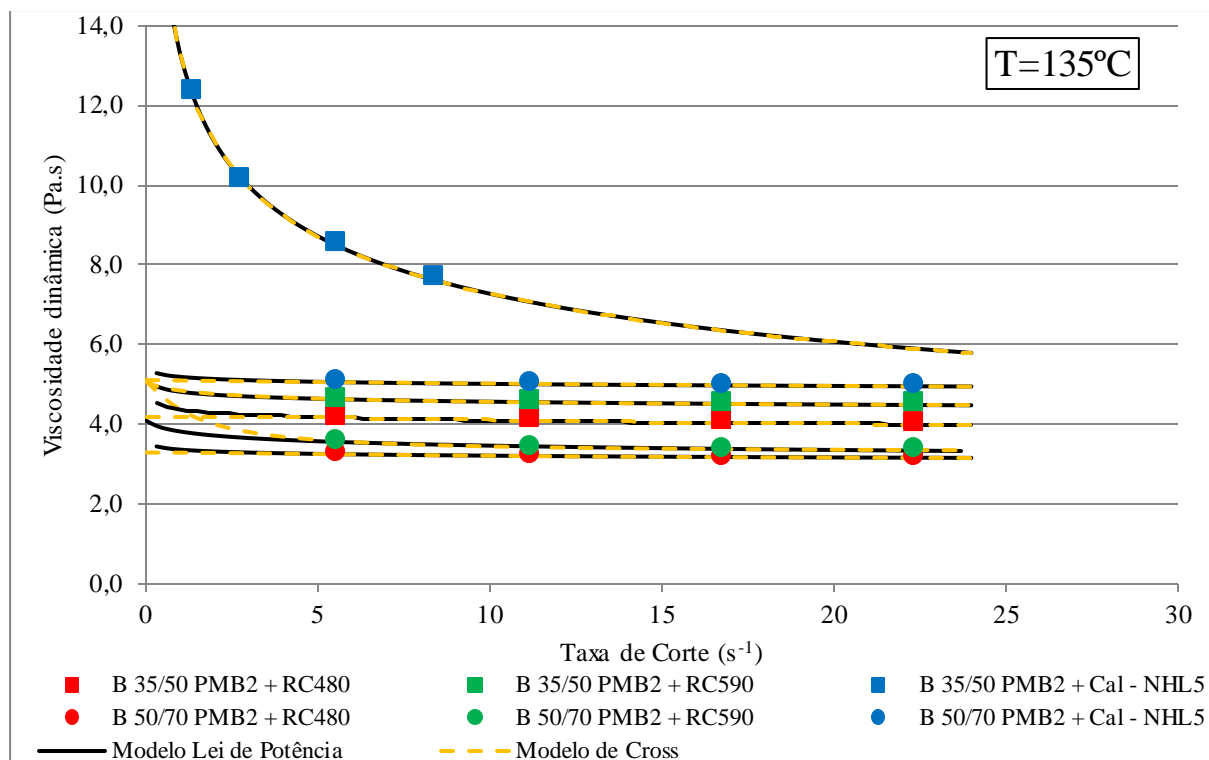


Figura C.12 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método B).

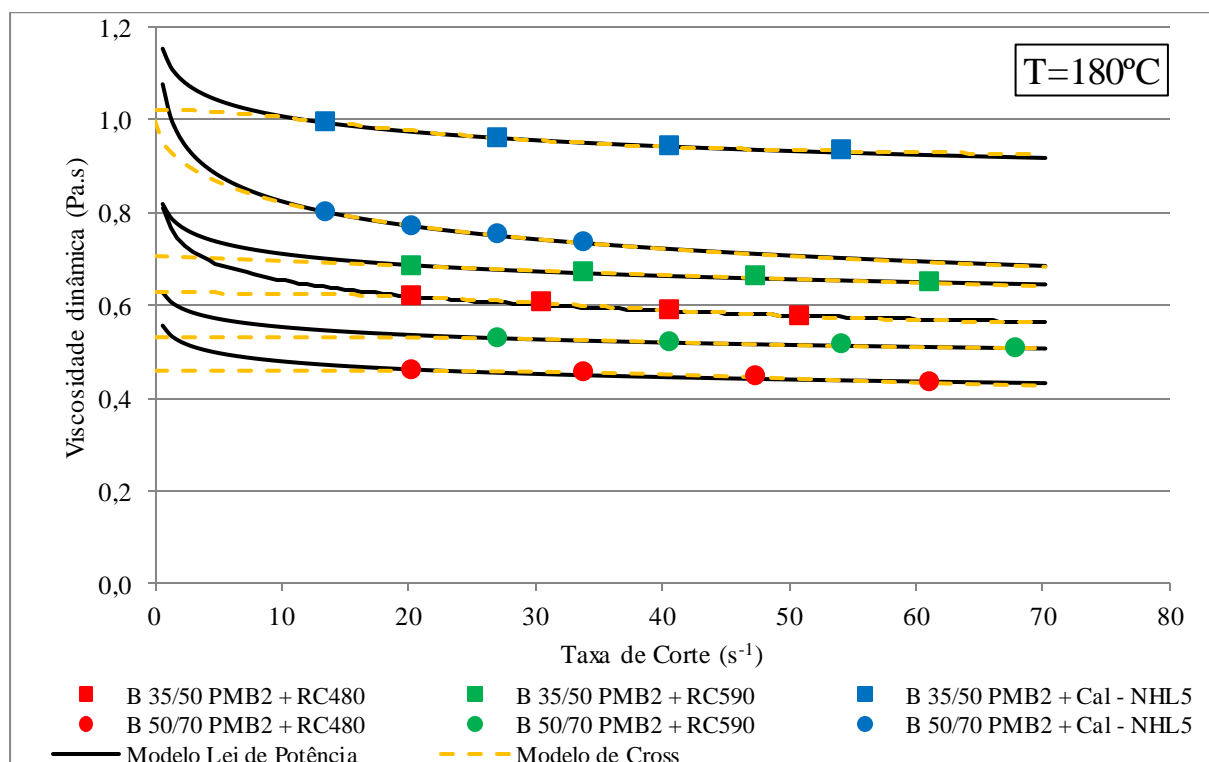


Figura C.13 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB2 e B 50/70 PMB2, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método B).

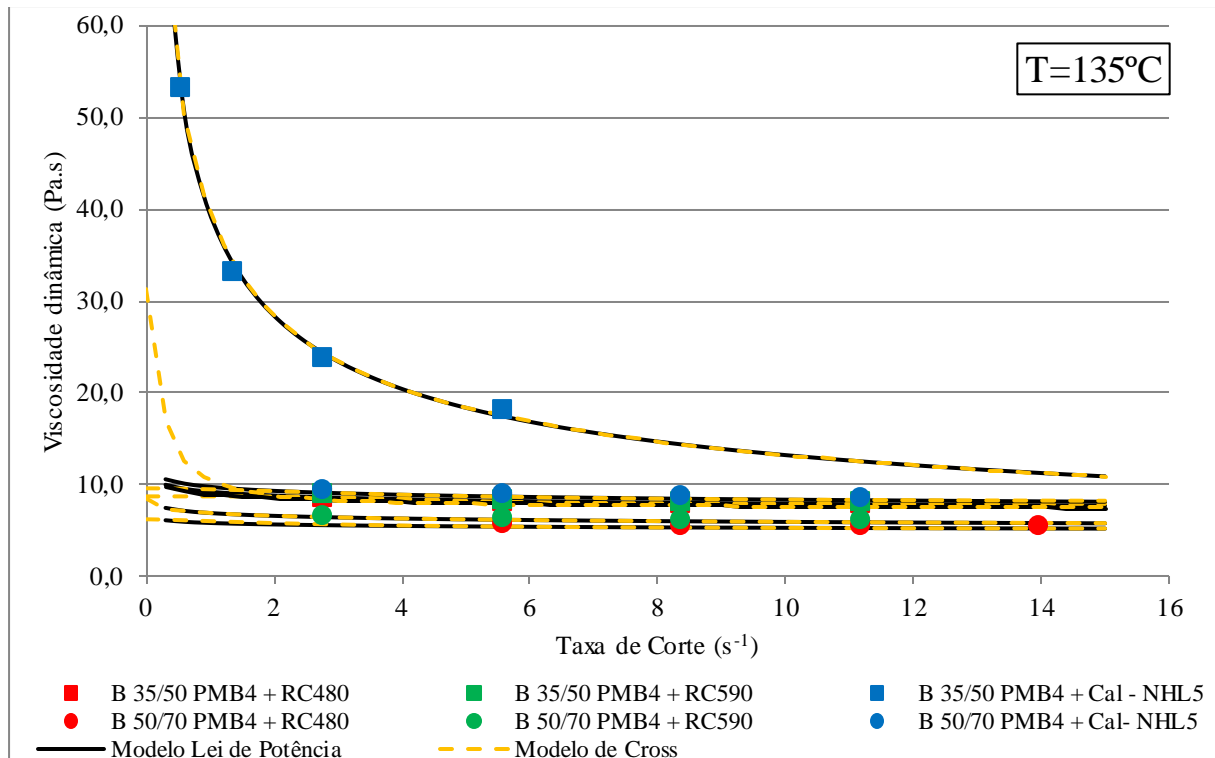


Figura C. 14 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 135°C para várias taxas de corte (Método B).

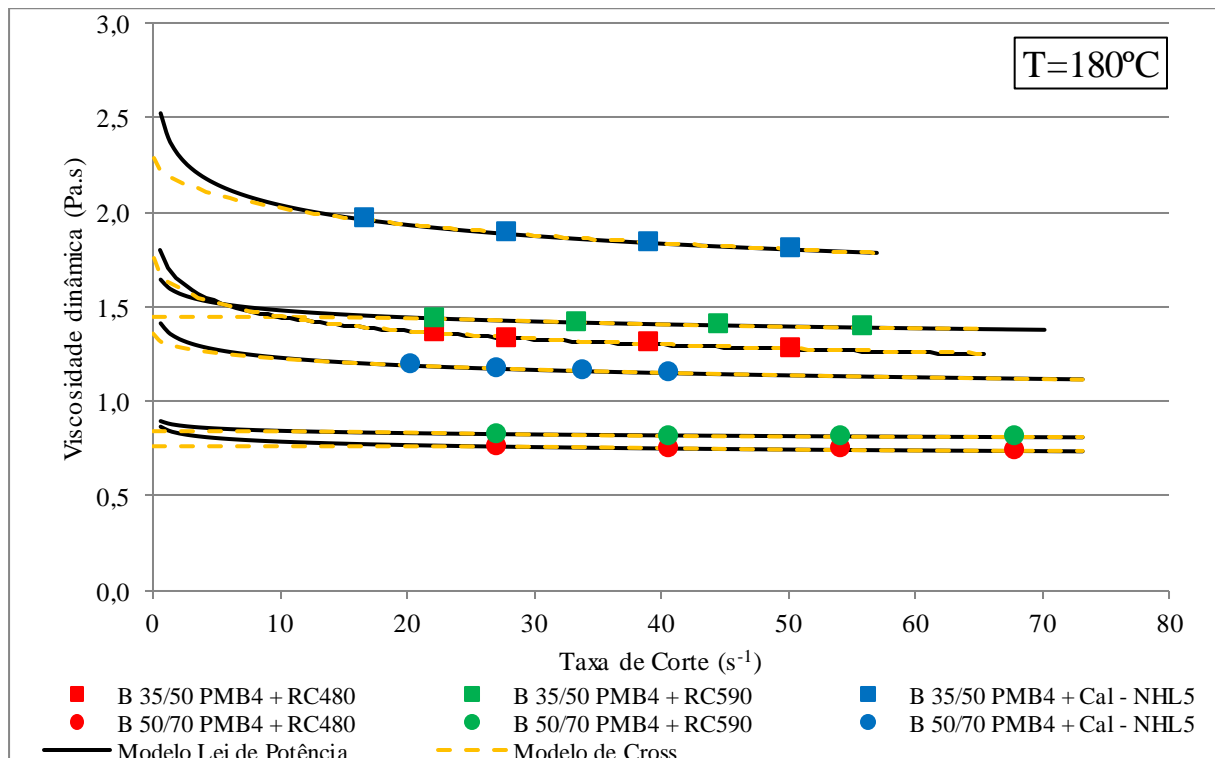


Figura C.15 – Viscosidade dinâmica dos mastiques com betumes B 35/50 PMB4 e B 50/70 PMB4, a uma temperatura de 180°C para várias taxas de corte (Método B).

Quadro C. 37 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 (Método A).

Método A			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 35/50	RC480	100	$\eta = 45,416\dot{\gamma}^{-0,02}$
		120	$\eta = 10,238\dot{\gamma}^{-0,012}$
		135	$\eta = 5,0138\dot{\gamma}^{-0,079}$
		150	$\eta = 2,205\dot{\gamma}^{-0,045}$
		165	$\eta = 1,1841\dot{\gamma}^{-0,061}$
		180	$\eta = 0,7708\dot{\gamma}^{-0,069}$
	RC590	100	$\eta = 54,962\dot{\gamma}^{-0,015}$
		120	$\eta = 11,868\dot{\gamma}^{-0,009}$
		135	$\eta = 5,6277\dot{\gamma}^{-0,046}$
		150	$\eta = 2,8839\dot{\gamma}^{-0,062}$
		165	$\eta = 1,6817\dot{\gamma}^{-0,068}$
		180	$\eta = 0,9561\dot{\gamma}^{-0,038}$
	Cal-NHL5	100	$\eta = 89,891\dot{\gamma}^{-0,086}$
		120	$\eta = 19,31\dot{\gamma}^{-0,048}$
		135	$\eta = 8,487\dot{\gamma}^{-0,081}$
		150	$\eta = 3,7849\dot{\gamma}^{-0,06}$
		165	$\eta = 1,8188\dot{\gamma}^{-0,046}$
		180	$\eta = 1,1029\dot{\gamma}^{-0,053}$

Quadro C.38 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 PMB2 (Método A).

Método A			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 35/50 PMB2	RC480	100	-
		120	$\eta = 23,398\dot{\gamma}^{-0,138}$
		135	$\eta = 8,3177\dot{\gamma}^{-0,051}$
		150	$\eta = 4,5546\dot{\gamma}^{-0,057}$
		165	$\eta = 2,1629\dot{\gamma}^{-0,043}$
		180	$\eta = 1,2352\dot{\gamma}^{-0,035}$
	RC590	100	-
		120	$\eta = 28,527\dot{\gamma}^{-0,164}$
		135	$\eta = 10,832\dot{\gamma}^{-0,205}$
		150	$\eta = 5,5719\dot{\gamma}^{-0,096}$
		165	$\eta = 2,4221\dot{\gamma}^{-0,027}$
		180	$\eta = 1,6556\dot{\gamma}^{-0,039}$
	Cal-NHL5	100	-
		120	$\eta = 93,582\dot{\gamma}^{-0,535}$
		135	$\eta = 39,09\dot{\gamma}^{-0,467}$
		150	$\eta = 9,4017\dot{\gamma}^{-0,131}$
		165	$\eta = 3,8608\dot{\gamma}^{-0,039}$
		180	$\eta = 2,1579\dot{\gamma}^{-0,045}$

Quadro C.39 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50PMB4 (Método A).

Método A			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 35/50 PMB4	RC480	100	-
		120	$\eta = 96,157\dot{\gamma}^{-0,418}$
		135	$\eta = 32,461\dot{\gamma}^{-0,301}$
		150	$\eta = 11,395\dot{\gamma}^{-0,081}$
		165	$\eta = 4,2072\dot{\gamma}^{-0,029}$
		180	$\eta = 2,3241\dot{\gamma}^{-0,023}$
	RC590	100	-
		120	$\eta = 83,787\dot{\gamma}^{-0,418}$
		135	$\eta = 39,766\dot{\gamma}^{-0,33}$
		150	$\eta = 14,036\dot{\gamma}^{-0,129}$
		165	$\eta = 4,8178\dot{\gamma}^{-0,021}$
		180	$\eta = 2,5945\dot{\gamma}^{-0,023}$
	Cal-NHL5	100	-
		120	-
		135	-
		150	$\eta = 71,713\dot{\gamma}^{-0,451}$
		165	$\eta = 13,988\dot{\gamma}^{-0,183}$
		180	$\eta = 4,8738\dot{\gamma}^{-0,046}$

Quadro C.40 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 (Método A).

Método A			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 50/70	RC480	100	$\eta = 30,02\dot{\gamma}^{-0,017}$
		120	$\eta = 7,295\dot{\gamma}^{-0,017}$
		135	$\eta = 3,3309\dot{\gamma}^{-0,033}$
		150	$\eta = 1,7675\dot{\gamma}^{-0,059}$
		165	$\eta = 0,9396\dot{\gamma}^{-0,046}$
		180	$\eta = 0,5761\dot{\gamma}^{-0,083}$
	RC590	100	$\eta = 36,056\dot{\gamma}^{-0,013}$
		120	$\eta = 8,5284\dot{\gamma}^{-0,02}$
		135	$\eta = 3,7007\dot{\gamma}^{-0,019}$
		150	$\eta = 2,1844\dot{\gamma}^{-0,046}$
		165	$\eta = 1,5229\dot{\gamma}^{-0,037}$
		180	$\eta = 0,8116\dot{\gamma}^{-0,068}$
	Cal-NHL5	100	$\eta = 65,048\dot{\gamma}^{-0,062}$
		120	$\eta = 15,14\dot{\gamma}^{-0,062}$
		135	$\eta = 5,8604\dot{\gamma}^{-0,032}$
		150	$\eta = 2,7772\dot{\gamma}^{-0,037}$
		165	$\eta = 1,4755\dot{\gamma}^{-0,034}$
		180	$\eta = 0,9758\dot{\gamma}^{-0,067}$

Quadro C.41 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB2 (Método A).

Método A			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 50/70 PMB2	RC480	100	$\eta = 66,364\dot{\gamma}^{-0,084}$
		120	$\eta = 14,543\dot{\gamma}^{-0,048}$
		135	$\eta = 5,5062\dot{\gamma}^{-0,023}$
		150	$\eta = 2,7761\dot{\gamma}^{-0,029}$
		165	$\eta = 1,5144\dot{\gamma}^{-0,03}$
		180	$\eta = 0,9442\dot{\gamma}^{-0,049}$
	RC590	100	$\eta = 66,364\dot{\gamma}^{-0,084}$
		120	$\eta = 14,543\dot{\gamma}^{-0,048}$
		135	$\eta = 5,5062\dot{\gamma}^{-0,023}$
		150	$\eta = 2,7761\dot{\gamma}^{-0,029}$
		165	$\eta = 1,5144\dot{\gamma}^{-0,03}$
		180	$\eta = 0,9442\dot{\gamma}^{-0,049}$
	Cal-NHL5	100	$\eta = 27,634\dot{\gamma}^{-0,1}$
		120	$\eta = 9,8441\dot{\gamma}^{-0,046}$
		135	$\eta = 4,9987\dot{\gamma}^{-0,076}$
		150	$\eta = 2,3932\dot{\gamma}^{-0,031}$
		165	$\eta = 1,5388\dot{\gamma}^{-0,064}$
		180	$\eta = 27,634\dot{\gamma}^{-0,1}$

Quadro C.42 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB4 (Método A).

Método A			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo lei de potência
B 50/70 PMB4	RC480	100	-
		120	$\eta = 32,879\dot{\gamma}^{-0,047}$
		135	$\eta = 10,525\dot{\gamma}^{-0,051}$
		150	$\eta = 4,241\dot{\gamma}^{-0,009}$
		165	$\eta = 2,3575\dot{\gamma}^{-0,018}$
		180	$\eta = 1,5608\dot{\gamma}^{-0,033}$
	RC590	100	-
		120	$\eta = 38,722\dot{\gamma}^{-0,028}$
		135	$\eta = 12,489\dot{\gamma}^{-0,051}$
		150	$\eta = 5,4818\dot{\gamma}^{-0,04}$
		165	$\eta = 2,8781\dot{\gamma}^{-0,024}$
		180	$\eta = 1,7541\dot{\gamma}^{-0,024}$
	Cal-NHL5	100	-
		120	$\eta = 44,188\dot{\gamma}^{-0,213}$
		135	$\eta = 20,5\dot{\gamma}^{-0,085}$
		150	$\eta = 9,3338\dot{\gamma}^{-0,08}$
		165	$\eta = 4,4146\dot{\gamma}^{-0,029}$
		180	$\eta = 2,6388\dot{\gamma}^{-0,041}$

Quadro C.43 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 (Método B).

Método B			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 35/50	RC480	100	$\eta = 19,643\dot{\gamma}^{-0,007}$
		120	$\eta = 4,6717\dot{\gamma}^{-0,213}$
		135	$\eta = 2,0018\dot{\gamma}^{-0,017}$
		150	$\eta = 0,9962\dot{\gamma}^{-0,035}$
		165	$\eta = 0,5316\dot{\gamma}^{-0,04}$
		180	$\eta = 0,4431\dot{\gamma}^{-0,013}$
	RC590	100	$\eta = 26,995\dot{\gamma}^{-0,006}$
		120	$\eta = 5,764\dot{\gamma}^{-0,017}$
		135	$\eta = 2,425\dot{\gamma}^{-0,021}$
		150	$\eta = 1,17\dot{\gamma}^{-0,045}$
		165	$\eta = 0,7194\dot{\gamma}^{-0,074}$
		180	$\eta = 0,5711\dot{\gamma}^{-0,155}$
	Cal-NHL5	100	$\eta = 40,448\dot{\gamma}^{-0,021}$
		120	$\eta = 9,5835\dot{\gamma}^{-0,024}$
		135	$\eta = 3,7851\dot{\gamma}^{-0,017}$
		150	$\eta = 1,7887\dot{\gamma}^{-0,034}$
		165	$\eta = 1,0524\dot{\gamma}^{-0,059}$
		180	$\eta = 0,733\dot{\gamma}^{-0,084}$

Quadro C. 44 - Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 PMB2 (Método B).

Método B			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 35/50 PMB2	RC480	100	-
		120	$\eta = 11,553\dot{\gamma}^{-0,099}$
		135	$\eta = 4,3734\dot{\gamma}^{-0,029}$
		150	$\eta = 2,4322\dot{\gamma}^{-0,004}$
		165	$\eta = 1,2318\dot{\gamma}^{-0,049}$
		180	$\eta = 0,7783\dot{\gamma}^{-0,076}$
	RC590	100	-
		120	$\eta = 12,366\dot{\gamma}^{-0,086}$
		135	$\eta = 4,8092\dot{\gamma}^{-0,023}$
		150	$\eta = 3,1834\dot{\gamma}^{-0,108}$
		165	$\eta = 1,2248\dot{\gamma}^{-0,024}$
		180	$\eta = 0,7975\dot{\gamma}^{-0,05}$
	Cal-NHL5	100	-
		120	$\eta = 40,035\dot{\gamma}^{-0,489}$
		135	$\eta = 13,262\dot{\gamma}^{-0,261}$
		150	$\eta = 4,6401\dot{\gamma}^{-0,127}$
		165	$\eta = 1,8714\dot{\gamma}^{-0,04}$
		180	$\eta = 1,1249\dot{\gamma}^{-0,048}$

Quadro C.45 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 35/50 PMB4 (método B).

Método B			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 35/50 PMB4	RC480	100	-
		120	$\eta = 23,986\dot{\gamma}^{-0,144}$
		135	$\eta = 8,9338\dot{\gamma}^{-0,067}$
		150	$\eta = 6,2768\dot{\gamma}^{-0,067}$
		165	$\eta = 2,8825\dot{\gamma}^{-0,067}$
		180	$\eta = 1,7315\dot{\gamma}^{-0,078}$
	RC590	100	-
		120	$\eta = 25,96\dot{\gamma}^{-0,125}$
		135	$\eta = 9,2472\dot{\gamma}^{-0,066}$
		150	$\eta = 6,6842\dot{\gamma}^{-0,069}$
		165	$\eta = 3,063\dot{\gamma}^{-0,052}$
		180	$\eta = 1,6125\dot{\gamma}^{-0,037}$
	Cal-NHL5	100	-
		120	$\eta = 70,845\dot{\gamma}^{-0,472}$
		135	$\eta = 39,418\dot{\gamma}^{-0,474}$
		150	$\eta = 14,82\dot{\gamma}^{-0,29}$
		165	$\eta = 4,8321\dot{\gamma}^{-0,115}$
		180	$\eta = 2,4262\dot{\gamma}^{-0,076}$

Quadro C.46 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 (Método B).

Método B			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 50/70	RC480	100	$\eta = 15,802\dot{\gamma}^{-0,015}$
		120	$\eta = 4,0127\dot{\gamma}^{-0,027}$
		135	$\eta = 1,7489\dot{\gamma}^{-0,022}$
		150	$\eta = 1,0387\dot{\gamma}^{-0,066}$
		165	$\eta = 0,6004\dot{\gamma}^{-0,111}$
		180	$\eta = 0,6631\dot{\gamma}^{-0,278}$
	RC590	100	$\eta = 18,285\dot{\gamma}^{-0,014}$
		120	$\eta = 4,7804\dot{\gamma}^{-0,029}$
		135	$\eta = 2,393\dot{\gamma}^{-0,043}$
		150	$\eta = 0,9298\dot{\gamma}^{-0,035}$
		165	$\eta = 0,5764\dot{\gamma}^{-0,111}$
		180	$\eta = 0,4847\dot{\gamma}^{-0,163}$
	Cal-NHL5	100	$\eta = 27,107\dot{\gamma}^{-0,017}$
		120	$\eta = 6,4415\dot{\gamma}^{-0,017}$
		135	$\eta = 2,8324\dot{\gamma}^{-0,034}$
		150	$\eta = 1,4419\dot{\gamma}^{-0,042}$
		165	$\eta = 0,8376\dot{\gamma}^{-0,073}$
		180	$\eta = 0,6693\dot{\gamma}^{-0,015}$

Quadro C.47 - Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB2 (Método B).

Método B			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 50/70 PMB2	RC480	100	$\eta = 34,878\dot{\gamma}^{-0,072}$
		120	$\eta = 7,7431\dot{\gamma}^{-0,024}$
		135	$\eta = 3,8579\dot{\gamma}^{-0,047}$
		150	$\eta = 1,6389\dot{\gamma}^{-0,014}$
		165	$\eta = 0,9693\dot{\gamma}^{-0,033}$
		180	$\eta = 0,5412\dot{\gamma}^{-0,053}$
	RC590	100	$\eta = 35,932\dot{\gamma}^{-0,081}$
		120	$\eta = 8,5174\dot{\gamma}^{-0,03}$
		135	$\eta = 3,3567\dot{\gamma}^{-0,02}$
		150	$\eta = 1,8526\dot{\gamma}^{-0,036}$
		165	$\eta = 1,0566\dot{\gamma}^{-0,046}$
		180	$\eta = 0,6134\dot{\gamma}^{-0,053}$
	Cal-NHL5	100	$\eta = 73,813\dot{\gamma}^{-0,081}$
		120	$\eta = 14,774\dot{\gamma}^{-0,073}$
		135	$\eta = 5,1841\dot{\gamma}^{-0,15}$
		150	$\eta = 2,8263\dot{\gamma}^{-0,046}$
		165	$\eta = 1,4406\dot{\gamma}^{-0,043}$
		180	$\eta = 1,0252\dot{\gamma}^{-0,095}$

Quadro C.48 – Equações do modelo da Lei de Potência para os mastiques com betume B 50/70 PMB4 (Método B).

Método B			
Betume	Filer	Temperatura (°C)	Modelo Lei de Potência
B 50/70 PMB4	RC480	100	-
		120	$\eta = 16,611\dot{\gamma}^{-0,051}$
		135	$\eta = 5,849\dot{\gamma}^{-0,41}$
		150	$\eta = 2,5531\dot{\gamma}^{-0,016}$
		165	$\eta = 1,417\dot{\gamma}^{-0,022}$
		180	$\eta = 0,8512\dot{\gamma}^{-0,034}$
	RC590	100	-
		120	$\eta = 19,23\dot{\gamma}^{-0,042}$
		135	$\eta = 6,9278\dot{\gamma}^{-0,065}$
		150	$\eta = 2,8635\dot{\gamma}^{-0,03}$
		165	$\eta = 1,5645\dot{\gamma}^{-0,026}$
		180	$\eta = 0,886\dot{\gamma}^{-0,021}$
	Cal-NHL5	100	-
		120	$\eta = 31,813\dot{\gamma}^{-0,134}$
		135	$\eta = 9,7849\dot{\gamma}^{-0,067}$
		150	$\eta = 4,062\dot{\gamma}^{-0,024}$
		165	$\eta = 2,2919\dot{\gamma}^{-0,03}$
		180	$\eta = 1,3773\dot{\gamma}^{-0,049}$

Quadro C.49 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 (método A).

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 35/50	RC480	100	0,1316	10,2642	53,6223
		120	0,5734	7,9986	10,3266
		135	5,2766	4,0298	4,3874
		150	0,9581	1,6315	2,0701
		165	1,7609	0,7323	1,0386
		180	67,7265	0,583	0,01875
	RC590	100	1,5066	54,0359	56,321
		120	3,6152	11,6034	11,8151
		135	1,1544	4,8574	6,7458
		150	2,9795	2,2642	2,5178
		165	1,3259	0,2261	1,4665
		180	3,5304	0,7905	0,8517
	CAL - NHL5	100	1,2688	80,3453	106,6932
		120	27,212	17,8	19,0375
		135	1,8589	6,615	8,0689
		150	2,6194	3,1288	3,5191
		165	2,7395	1,5479	1,6911
		180	39,6444	0,8969	0,961

Quadro C.50 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB2 (método A).

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 35/50 PMB2	RC480	100	-	-	-
		120	0,5229	15,7368	1479,96
		135	0,2871	4,3472	8,0689
		150	0,576	3,3619	5,084
		165	2,5122	1,8665	1,6911
		180	0,8563	0,8063	1,1629
	RC590	100	-	-	-
		120	0,46503	16,5649	2103,84
		135	1,0512	7,64	11,8487
		150	1,5564	4,0654	6,2009
		165	0,8817	2,1737	2,8578
		180	1,4527	1,2429	1,5118
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	1,8761	56,9681	201,0641
		135	0,5892	5,6151	91985,01
		150	0,7761	5,5233	11,2139
		165	1,1099	1,1808	3,6581
		180	1,1941	1,7669	2,075

Quadro C.51 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB4 (método A).

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 35/50 PMB4	RC480	100	-	-	-
		120	1,2426	39,0734	190,0234
		135	0,5831	12,4806	27088,7
		150	0,5831	8,95306	11,18665
		165	45,2065	3,9074	3,9938
		180	1,8883	1,272	2,1964
	RC590	100	-	-	-
		120	1,7553	56,3397	160,5699
		135	0,5009	10,5978	18243,14
		150	0,915	7,7813	14,3546
		165	0,5924	4,3294	5,0744
		180	2,1441	2,352	2,4722
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	-	-	-
		135	-	-	-
		150	1,4926	38,9044	142,1865
		165	0,7573	7,7308	26,3084
		180	0,7143	2,893	4,7239

Quadro C.52 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 (método B).

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B35/50	RC480	100	23,1494	19,4063	19,4587
		120	6,3384	4,5039	4,5645
		135	0,8068	1,6995	1,958
		150	0,9588	0,853	1,0524
		165	5,0057	0,4482	0,4707
		180	7,7348	0,2526	0,2835
	RC590	100	26,3187	26,8	27,0625
		120	5,71	5,4974	5,5997
		135	1,0503	1,94	2,3487
		150	2,0172	0,9549	1,0676
		165	0,5096	0,3088	0,6821
		180	1,0882	0,0222	0,382
	CAL - NHL5	100	0,14402	0	46,5512
		120	1,2109	9,0138	12,6689
		135	1,4767	3,5385	3,7203
		150	3,3538	1,5812	1,6629
		165	2,3587	0,8339	0,9435
		180	1,9847	0,4735	0,5767

Quadro C.53 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB2 (método B)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B35/50 PMB 2	RC480	100	-	-	-
		120	0,7968	8,7597	23,9787
		135	2,3598	3,9372	4,1845
		150	6,0501	2,0822	2,1719
		165	0,9336	0,7814	1,1313
		180	2,7876	0,5433	0,6265
	RC590	100	-	-	-
		120	0,724	9,5962	24,8053
		135	0,7093	4,3393	5,0698
		150	7,5941	2,2037	2,5887
		165	2,4053	0,5606	1,1499
		180	1,0952	0,4829	0,7058
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	0,54901	5,847	68525,99
		135	0,6672	4,8571	29,3275
		150	0,4356	0,9751	5,1255
		165	1,6262	1,5473	1,7556
		180	2,0503	0,9163	1,0204

Quadro C.54 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 35/50 PMB4 (método B)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
MB 35/50 PMB4	RC480	100	-	-	-
		120	20,5284	18,8938	23,075
		135	1,2719	7,4894	31,3546
		150	1,2418	4,4253	5,8064
		165	0,2687	1,6545	3,4042
		180	0,6216	1,0522	1,7536
	RC590	100	-	-	-
		120	24,9774	21,1094	25,1
		135	4,8609	7,9291	8,753
		150	0,3597	3,89361	8,4882
		165	1,7401	2,4818	2,8147
		180	3,513	1,3747	1,4462
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	1,5032	34,4032	136,2025
		135	0,5782	4,8588	92775,15
		150	0,6507	4,4458	33,5617
		165	1,0238	3,1848	8,2075
		180	0,5769	1,243	2,2896

Quadro C.55 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 (método A)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 50/70	RC480	100	30,3513	29,3938	30,2188
		120	0,7464	6,5605	7,3321
		135	4,4662	2,9713	3,0873
		150	1,0276	1,3749	1,7719
		165	3,6562	0,7626	0,8314
		180	2,7847	0,3918	0,4557
	RC590	100	0,1245	30,0559	45,6059
		120	3,0053	8,0804	8,3721
		135	1,55896	2,6277	3,5508
		150	2,5841	1,7264	1,9052
		165	1,7121	0,957	1,0642
		180	1,913	0,5258	0,659
	CAL - NHL5	100	1,50604	61,4931	75,2948
		120	0,7721	4,3613	15,1319
		135	0,8029	5,2986	8,2024
		150	0,5987	2,331	3,1734
		165	2,9058	1,2855	1,3594
		180	1,117	0,7277	1,2219

Quadro C.56 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB2 (método A)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 50/70 PMB2	RC480	100	1,4169	61,1839	81,1977
		120	1,3065	12,2006	14,5947
		135	1,1627	4,0968	5,3375
		150	3,5181	2,4876	2,5954
		165	4,8042	1,3448	1,398
		180	1,5889	0,6956	0,8289
	RC590	100	1,4169	61,1839	81,1977
		120	1,3065	12,2006	14,5947
		135	1,1627	4,0968	5,3375
		150	3,5181	2,4876	2,5954
		165	4,8042	1,3448	1,398
		180	1,5889	0,6956	0,8289
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	2,1063	22,7536	29,7536
		135	4,1955	8,8612	9,5058
		150	1,6258	3,8612	6,4376
		165	3,373	2,1297	2,2531
		180	1,0596	1,0528	1,3884

Quadro C.57 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB4 (método A)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 50/70 PMB4	RC480	100	-	-	-
		120	0,1378	0	37,5634
		135	0,5916	8,2544	11,8182
		150	3,00199	4,0974	4,1773
		165	1,4419	1,13299	2,26661
		180	9,6847	1,3787	1,4072
	RC590	100	-	-	-
		120	0,2116	32,7039	102,389
		135	0,6004	6,2334	13,1268
		150	1,2668	4,8061	9,4075
		165	6,5049	2,6605	2,7257
		180	10,8023	1,5311	1,5647
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	1,8581	37,0074	61,8345
		135	27,8417	17,7344	19,95
		150	2,3278	7,6843	9,4256
		165	1,3727	4,021358	15,6368
		180	0,6483	1,9488	2,5808

Quadro C.58 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 (método B)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 50/70	RC480	100	0,9403	14,5308	15,9102
		120	4,0158	3,7235	3,8493
		135	2,1043	1,5073	1,6656
		150	1,1165	0,7853	1,0991
		165	0,6093	0,2304	0,5425
		180	8,5374	0,2123	0,2511
	RC590	100	23,542	17,8625	18,2
		120	6,0434	4,4292	4,5635
		135	2,0957	2,0639	3,7858
		150	7,4887	0,8186	0,8469
		165	7,524	0,4275	0,4511
		180	10,0731	0,2435	0,2653
	CAL - NHL5	100	0,1433	7,1253	30,8865
		120	1,02	6,1359	6,8696
		135	5,4827	2,5324	2,6357
		150	9,5889	1,24	1,2791
		165	0,8714	0,3994	0,742
		180	2,4683	0,4276	0,3276

Quadro C.59 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB2 (método B)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 50/70 PMB2	RC480	100	0,6517	30,3761	1704,393
		120	2,0344	7,2084	7,6176
		135	1,624	3,1082	3,2843
		150	12,7874	1,5591	1,58099
		165	6,6489	0,8636	0,8919
		180	4,8699	0,4175	0,4588
	RC590	100	0,61101	30,4612	1776,12
		120	1,0896	6,3383	8,3661
		135	1,2096	3,2849	5,0656
		150	8,4536	1,6316	1,6762
		165	1,6309	0,879	1,0003
		180	4,5866	0,5045	0,5309
	CAL - NHL5	100	1,2726	55,54908	108,2965
		120	1,306	11,8884	15,1938
		135	0,9126	4,4846	5,1047
		150	1,3875	2,3869	5,316
		165	3,4871	1,2332	1,3272
		180	0,6096	0,5165	0,9971

Quadro C.60 - Parâmetros obtidos pela modelação do Modelo de Cross para os mastiques produzidos com B 50/70 PMB4 (método B)

Betume	Fíler	T (°C)	m	η_{∞}	η_0
B 50/70 PMB4	RC480	100	-	-	-
		120	2,2236	13,6758	16,2399
		135	1,4304	5,1531	6,2491
		150	1,0235	2,1985	2,4854
		165	8,81597	1,29386	1,3219
		180	5,73669	0,73669	0,7625
	RC590	100	-	-	-
		120	27,1463	17,7875	18,85
		135	0,5019	4,961	8,4944
		150	0,8413	2,2277	2,7533
		165	5,1823	1,4091	1,4506
		180	3,685	0,8105	0,8421
	CAL - NHL5	100	-	-	-
		120	0,1853	0	111,0098
		135	1,7656	8,1098	9,6179
		150	5,7965	3,7481	3,8398
		165	9,6829	2,05301	2,09243
		180	0,483	0,85476	1,3584

Anexo D – Temperaturas de fabrico e compactação dos mastiques

Quadro D.1 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de $6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método A).

Método A				
Superpave e ZSRV-S				
$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Betume	Fíler	Equação	R ²
6,8	B 35/50	RC480	$\eta = e^{-0,527T+8,7704}$	0,9755
		RC590	$\eta = e^{-0,0498T+8,6069}$	0,9665
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,055T+9,6212}$	0,9832
	B 35/50 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,046T+8,3299}$	0,9936
		RC590	$\eta = e^{-0,0443T+8,2535}$	0,9868
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0552T+10,439}$	0,9765
	B 35/50 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0513T+9,9473}$	0,9952
		RC590	$\eta = e^{-0,0523T+10,236}$	0,995
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0744T+14,778}$	0,9724

Quadro D.2 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de $6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método B).

Método B				
Superpave e ZSRV-S				
$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Betume	Fíler	Equação	R ²
6,8	B 35/50	RC480	$\eta = e^{-0,524T+7,94}$	0,9829
		RC590	$\eta = e^{-0,0528T+8,217}$	0,9714
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0525T+8,6189}$	0,9768
	B 35/50 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0452T+7,5932}$	0,9954
		RC590	$\eta = e^{-0,0454T+7,7268}$	0,9939
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,049T+8,7008}$	0,9918
	B 35/50 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0411T+7,7789}$	0,9869
		RC590	$\eta = e^{-0,0429T+8,0893}$	0,9833
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0482T+9,36}$	0,9977

Quadro D.3 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 500 s^{-1} (Método A).

Método A				
HSRV-E				
$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Betume	Fíler	Equação	R ²
500	B 35/50	RC480	$\eta = e^{-0,536T+8,7414}$	0,9755
		RC590	$\eta = e^{-0,057T+9,3912}$	0,9102
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0559T+9,6892}$	0,9892
	B 35/50 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0459T+8,1567}$	0,9894
		RC590	$\eta = e^{-0,0432T+7,9456}$	0,9947
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0551T+10,0137}$	0,842
	B 35/50 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0529T+9,9579}$	0,9787
		RC590	$\eta = e^{-0,049T+9,5337}$	0,9353
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0823+15,885}$	0,971

Quadro D.4 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 500 s^{-1} (Método B)

Método B				
HSRV-E				
$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1})$	Betume	Fíler	Equação	R^2
500	B 35/50	RC480	$\eta = e^{-0,0537T+8,0575}$	0,9821
		RC590	$\eta = e^{-0,0651T+9,6566}$	0,992
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0535T+8,6711}$	0,9872
	B 35/50 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0474T+7,8073}$	0,9914
		RC590	$\eta = e^{-0,0521T+8,4849}$	0,9567
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,035T+6,1543}$	0,9581
	B 35/50 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0459T+8,3558}$	0,9936
		RC590	$\eta = e^{-0,0442T+8,1957}$	0,9867
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0459T+8,561}$	0,878

Quadro D.5 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 50/70, para uma taxa de corte de $6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método A)

Método A				
Superpave e ZSRV-S				
$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1})$	Betume	Fíler	Equação	R^2
6,8	B 50/70	RC480	$\eta = e^{-0,511T+8,229}$	0,9847
		RC590	$\eta = e^{-0,0489T+8,1264}$	0,9733
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0527T+9,0675}$	0,9731
	B 50/70 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0532T+9,1084}$	0,9756
		RC590	$\eta = e^{-0,054T+9,4069}$	0,9712
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0472T+8,6629}$	0,9885
	B 50/70 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0502T+9,177}$	0,9709
		RC590	$\eta = e^{-0,0515T+9,5387}$	0,9738
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0641T+9,0862}$	0,9944

Quadro D.6 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 50/70, para uma taxa de corte de $6,8 \text{ s}^{-1}$ (Método B)

Método B				
Superpave e ZSRV-S				
$\dot{\gamma} (\text{s}^{-1})$	Betume	Fíler	Equação	R^2
6,8	B 50/70	RC480	$\eta = e^{-0,0508T+7,578}$	0,9881
		RC590	$\eta = e^{-0,0529T+7,9858}$	0,9882
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0509T+8,0662}$	0,9787
	B 50/70 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0516T+8,3463}$	0,9839
		RC590	$\eta = e^{-0,0505T+8,2627}$	0,9838
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0523T+8,9693}$	0,9747
	B 50/70 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0491T+8,4333}$	0,9836
		RC590	$\eta = e^{-0,0503T+8,716}$	0,9802
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0491T+8,8976}$	0,9795

Quadro D.7 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 50/70, para uma taxa de corte de 500 s^{-1} (Método A)

Método A				
HSRV-E				
$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Betume	Fíler	Equação	R ²
500	B 50/70	RC480	$\eta = e^{-0,0528T+8,386}$	0,9848
		RC590	$\eta = e^{-0,0506T+8,2423}$	0,9692
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,051T+8,6244}$	0,925
	B 50/70 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0541T+9,1468}$	0,9693
		RC590	$\eta = e^{-0,0553T+9,5131}$	0,9673
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0502T+9,0291}$	0,9917
	B 50/70 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,506T+9,0746}$	0,946
		RC590	$\eta = e^{-0,0482T+8,9373}$	0,9313
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0485T+9,3967}$	0,9979

Quadro D. 8 - Equações que relacionam a temperatura e a viscosidade dos betumes dos mastiques da classe 35/50, para uma taxa de corte de 500 s^{-1} (Método B).

Método B				
HSRV-E				
$\dot{\gamma} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Betume	Fíler	Equação	R ²
500	B 50/70	RC480	$\eta = e^{-0,0537T+7,8448}$	0,9841
		RC590	$\eta = e^{-0,0537T+8,0508}$	0,9888
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0544T+8,4089}$	0,9871
	B 50/70 PMB2	RC480	$\eta = e^{-0,0521T+8,3767}$	0,9863
		RC590	$\eta = e^{-0,0498T+8,0844}$	0,9779
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,035T+6,1543}$	0,9581
	B 50/70 PMB 4	RC480	$\eta = e^{-0,0482T+8,2275}$	0,9825
		RC590	$\eta = e^{-0,0498T+8,571}$	0,9611
		Cal-NHL5	$\eta = e^{-0,0428T+7,7545}$	0,994

Anexo E – Fichas técnicas dos fileres



eurocálcio
CALCÁRIOS E INERTES, SA

FICHA TÉCNICA DO PRODUTO Nº01 - Rev.8

CE

1029

EUROCALCIO - Calcários e Inertes, SA

Vale de Ourém, S.Mamede - Apartado 96 - 2496-908 Fátima
Centro de Produção: Fábrica "Vale de Ourém"

<p>06</p> <p>NP EN 13043:2004 Agregados Misturas Betuminosas CCPF Nº 1029 - CPD - PT06/01944</p>	<p>05</p> <p>EN 12620:2002+A1:2008 Agregados para Betão CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01472</p>	<p>NP EN 13139:2005 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01473</p>
---	--	--

Tipo de agregado:	Filer				
Desig. Comercial:	RC 480				
Caracterização	Ref. Normativa	EN 12620+A1 Betão	NP EN 13043 Mist. Betuminosas	NP EN 13139 Argamassas	
REQUISITOS FÍSICOS					
Qualidade dos Finos - Azul Metileno	NPEN 933-9	VD - E < 1,5 MB g/kg	VD - E < 1,5 MB g/kg	VD - E < 1,5 MB g/kg	
Massa Volúmica das partículas	NPEN 1097-7	VD - I 2,71 Mg/m³	VD - E 2,71±0,1 Mg/m³	VD - I 2,71 Mg/m³	
Teor de Humidade	NPEN 1097-5		VD - E < 0,5 %		
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	EN 1097-4		DND		
"Variação da temperatura anel e bola"	EN 13179-1		DND		
Solubilidade na Água	EN 1744-1, secção 16		VD - I < 0,2%		
Susceptibilidade à Água	NPEN 1744-1		DND		
"Número de betume"	EN 13179-2		DND		
Superfície Específica - Método Blaine	NP EN 196-6		VD - I 3680 cm²/g		
Durabilidade: Reactividade Alcalis-Silica	ASTM 1260	VD - I 0,00%		VD - I 0,00%	
REQUISITOS QUÍMICOS					
Teor de Cloretos		VD - E < 0,001%		VD - I < 0,001%	
Sulfatos solúveis em ácido		C - E ASe,2		C - E ASe,2	
Enxofre total	NPEN 1744-1	VD - E < 0,04%		VD - E < 0,04%	
Teor de húmus		VD - E < LA		VD - E < LA	
Contaminantes Orgânicos Leves		VD - E < LA		VD - I < LA	
Teor de Carbonato CO ₂	NPEN 196-21	VD - E 44±1%			
Teor de Carbonato CaCO ₃	Cálculo	VD - E 99±1%			
Descrição Petrográfica Simplificada NP EN 932-3:2002 "R"	Agregado	Minerais	Forma e Angularidade	Condições de superfície	
	Fragmentos de rocha	Calcite	Esfericidade Sub-prismática a sub-discoidal	Arredondamento Muito anguloso a sub-anguloso	Rugosa

Nota: Produto obtido a partir de pedra natural, pelo que está sujeito a algumas variações (cor) resultantes do processo de formação da própria pedra.

GRANULOMETRIA

Malha mm	Granulometria Típica %	Tolerâncias	
		Valor Mínimo	Valor Máximo
2	100	100	100
0,125	99	98	100
0,063	83,5	78,5	88,5

Fuso Granulométrico



LEGENDA: VD - valor declarado C - categoria LA - limite aceitação
 "I" - Irregular DND - Desempenho Não Determinado
 "R" - Regular

Elaborou:

Aprovou:

Data: 10-02-2011

Figura E.1 - Características do filer RC480

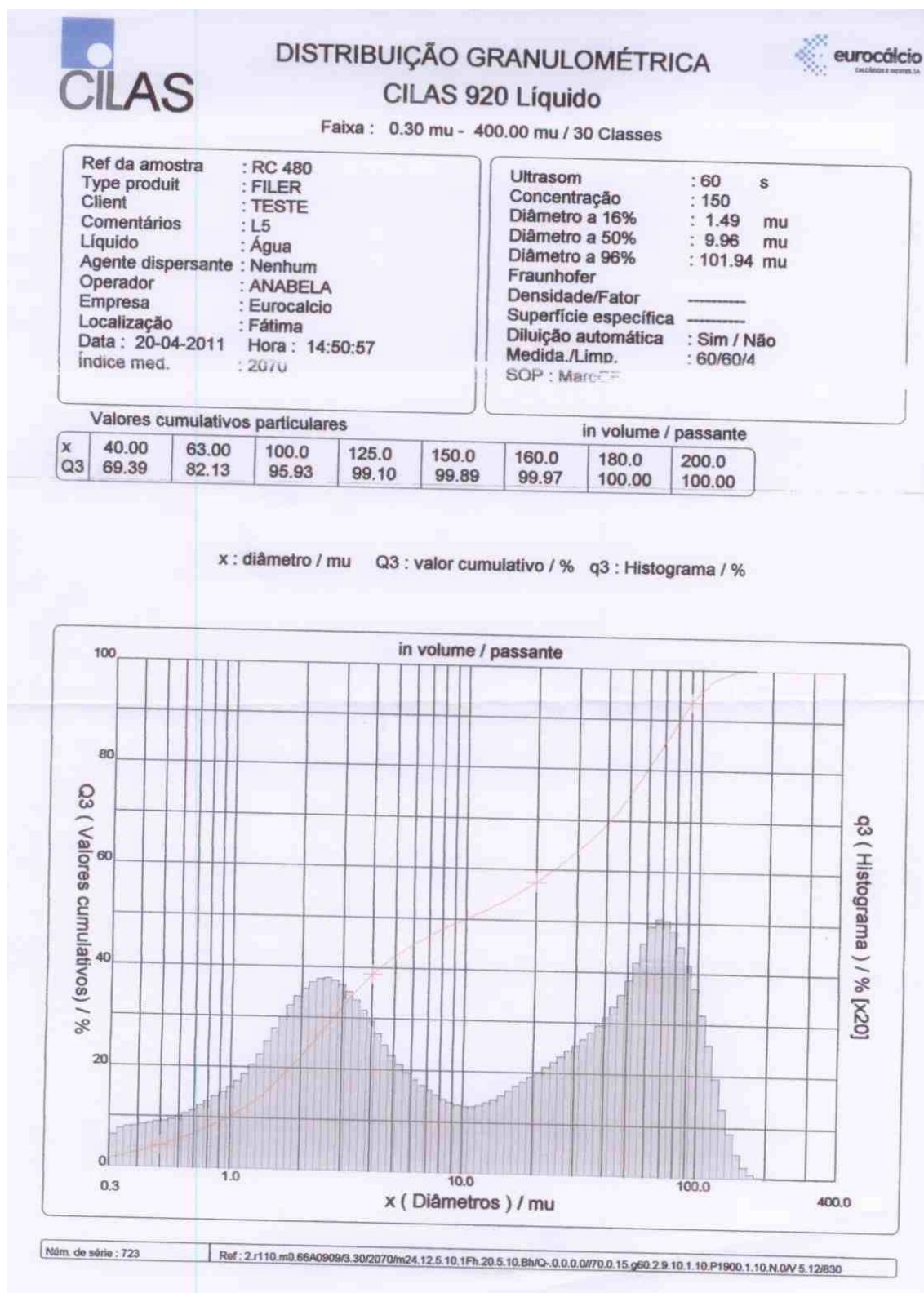


Figura E.2 - Distribuição granulométrica do filer RC480.



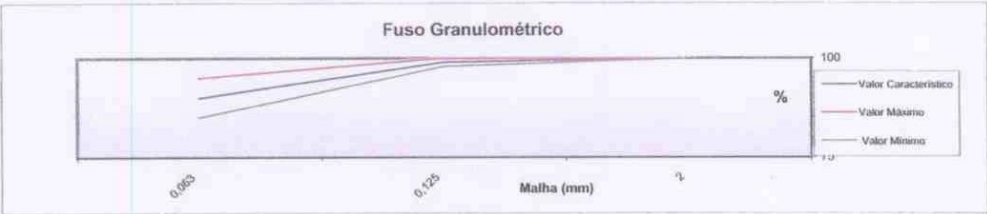


 eurocálcio CALCÁRIOS E INERTES, SA		FICHA TÉCNICA DO PRODUTO Nº02 - Rev.8																					
 1029																							
EUROCÁLCIO - CALCÁRIOS E INERTES, SA Vale de Ourém, S.Mamede - Apartado 96 - 2496-908 Fátima Centro de Produção: Fábrica "Vale de Ourém"																							
06 NP EN 13043:2004 Agregados Misturas Betuminosas CCPF Nº 1029 - CPD - PT06/01944		05 EN 12620:2002+A1:2008 Agregados para Betão CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01472		NP EN 13139:2005 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01473																			
Tipo de agregado: Filer Desig. Comercial: RC 590		Refª. Normativa: EN 12620+A1, NP EN 13043, NP EN 13139																					
Caracterização		EN 12620+A1: Betão NP EN 13043: Mist. Betuminosas NP EN 13139: Argamassas																					
REQUISITOS FÍSICOS																							
Qualidade dos Finos - Azul Metileno		NPEN 933-9																					
Massa Volumica das particulas		NPEN 1097-7																					
Teor de Humidade		NPEN 1097-5																					
Vazios do filer seco compactado (Rigden)		EN 1097-4																					
"Variação da temperatura anel e bola"		EN 13179-1																					
Solubilidade na Água		EN 1744-1, secção 16																					
Susceptibilidade à Água		NPEN 1744-1																					
"Número de betume"		EN 13179-2																					
Superfície Específica - Método Blaine		NP EN 196-6																					
Durabilidade: Reactividade Alcalis-Silica		ASTM 1260																					
REQUISITOS QUÍMICOS																							
Teor de Cloretos		VD I < 0,001%																					
Sulfatos solúveis em ácido		C R AS _{0,2}																					
Enxofre total		NPEN 1744-1																					
Teor de húmus		VD R < 0,04%																					
Contaminantes Orgânicos Leves		VD F < LA																					
Teor de Carbonato		VD I < LA																					
CO ₂		NPEN 196-21																					
CaCO ₃		Cálculo																					
VD R 44±1%		VD R 99±1%																					
Descrição Petrográfica Simplificada NP EN 932-3:2002 "R"		Agregado: Minerais Fragmentos de rocha: Calcite																					
		Forma e Angularidade: Esfericidade: Sub-primitica a sub-discoidal Arredondamento: Muito anguloso a sub-anguloso Condições de superfície: Rugosa																					
Nota: Produto obtido a partir de pedra natural, pelo que está sujeito a algumas variações (cor) resultantes do processo de formação da própria pedra.																							
GRANULOMETRIA																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Malha mm</th> <th rowspan="2">Granulometria Típica %</th> <th colspan="2">Tolerâncias</th> </tr> <tr> <th>Valor Mínimo</th> <th>Valor Máximo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>0,125</td> <td>99</td> <td>98</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>0,063</td> <td>90,0</td> <td>85,0</td> <td>95,0</td> </tr> </tbody> </table>						Malha mm	Granulometria Típica %	Tolerâncias		Valor Mínimo	Valor Máximo	2	100	100	100	0,125	99	98	100	0,063	90,0	85,0	95,0
Malha mm	Granulometria Típica %	Tolerâncias																					
		Valor Mínimo	Valor Máximo																				
2	100	100	100																				
0,125	99	98	100																				
0,063	90,0	85,0	95,0																				
																							
LEGENDA: VD - valor declarado I - Fuso Inicial F - Fuso Regular C - categoria LA - limite aceitação DND - Desempenho Não Determinado																							
Elaborou: 		Aprovou: 		Data: 10-02-2011																			

Figura E.3 - Características do filer RC590

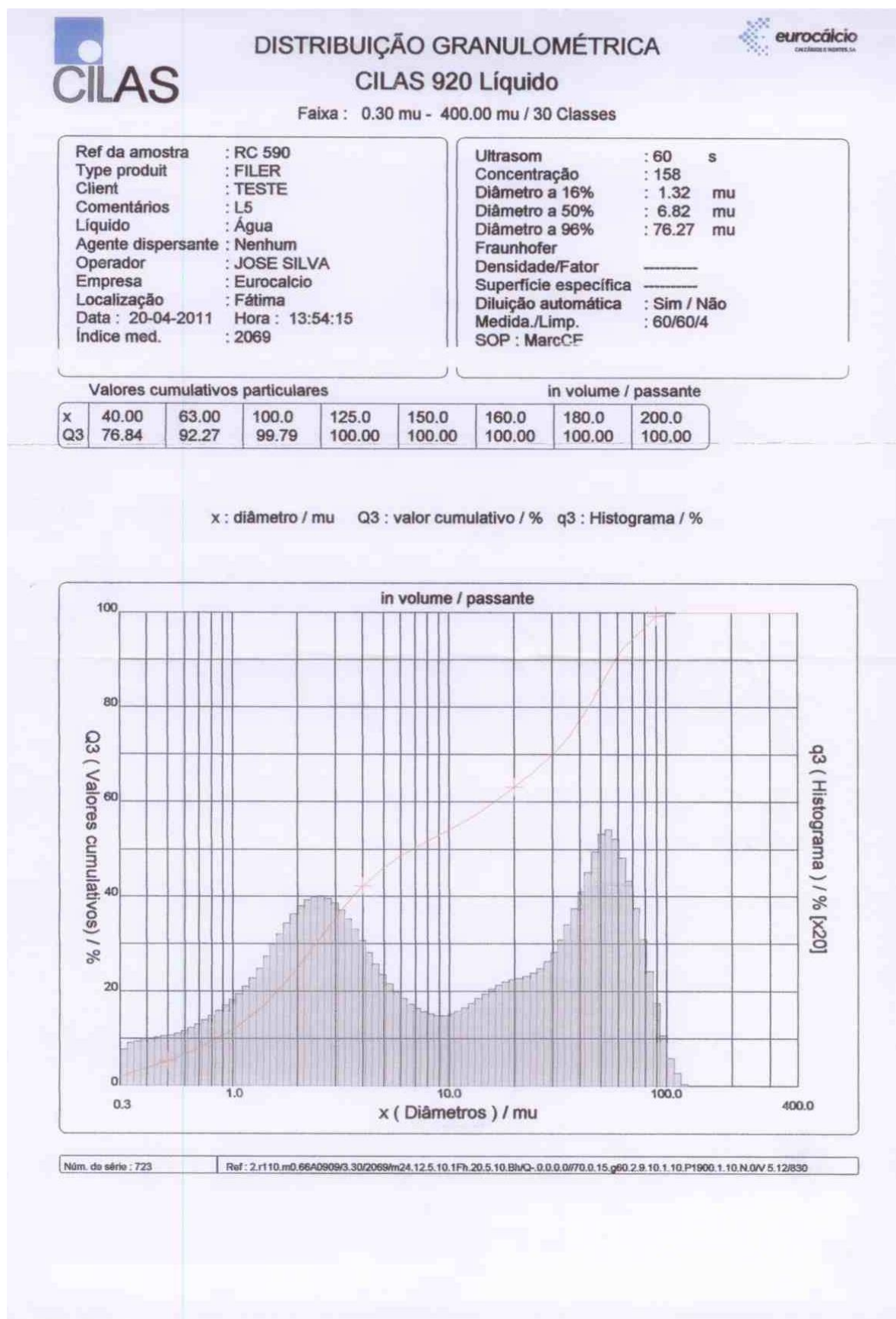



Figura E.4 - Distribuição granulométrica do filer RC590.



DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE CE

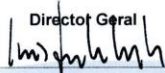
SECIL MARTINGANÇA, SA	
Sede:	Fábrica:
Apartado 2 EC MACEIRA	Rua do Mercado, s/nº
2406-909 MACEIRA LRA	2405-018 MACEIRA LRA
Telef. 244 770 220 Fax 244 777 997	Telef. 244 770 220 Fax: 244 777 997
e-mail: geral@secilmartinganca.pt	
www.secilmartinganca.pt	

Fíler Comercial - Cal Hidráulica Natural NHL5

	Norma de referência: NP EN 13043
	Utilização prevista: Agregado para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.
Características	
Granulometria:	% de passado (massa)
2 mm	100
0,125 mm	95 ± 5
0,063 mm	80 ± 5
Teor em água	≤ 1 %
Finura (blaine)	5000 a 6400 cm²/g
Massa Volúmica do Fíler	2,70 a 2,90 Mg/ m³
Vazios de fíler seco compactado	28/45 µ
Varição de temperatura anel e bola	DND ⁽¹⁾
Número de betume do fíler comercial	DND ⁽¹⁾
Solubilidade em água	WS ₁₀
Susceptibilidade em água	DND ⁽¹⁾
Azul de metileno	MB F ₁₀
Massa Volúmica aparente (queroseno)	0,5 a 0,9 Mg/m³

(1) - desempenho não determinado (anexo ZA, secção ZA, 1 da NP EN 13043)

Certificado de Controlo de Produção da Fábrica
1328 - CPD - 0148

Director Geral

Luis Goocha dos Santos

11 de Novembro de 2010

TC.E.0355/1

SECIL MARTINGANÇA S.A.
Apartado 2
2406-909 MACEIRA LRA - PORTUGAL
Tel: 244 770 220 - Fax: 244 777 997
geral@secilmartinganca.pt
www.secilmartinganca.pt

Figura E.5 - Ficha técnica da Cal Hidráulica

Anexo F – Temperaturas de fabrico e compactação recomendadas pelos produtores

BETUMES MODIFICADOS
 35/50 mod- 50/70 mod – IP mod –
 RIGI mod – ELASTO mod – 80/130 mod



Os betumes modificados com polímeros destinam-se a dar cumprimento aos cadernos de encargos actualmente em vigor, assim como a dar resposta a situações específicas de solicitação dos pavimentos.

A modificação dos betumes confere-lhes características que permitem uma melhoria na recuperação elástica e adesividade aos agregados, menor susceptibilidade a temperaturas extremas e maior resistência ao envelhecimento, à fadiga e deformações permanentes dos pavimentos.

Aplicações

Camadas de desgaste de rodovias em especial rugosas e drenantes, camadas delgadas, misturas de alto módulo, sistemas anti-fissuras.

Produtos	Aplicações
Galp 35/50 mod- 50/70 mod	Misturas rugosas e drenantes.
Galp IP mod	Rugosas, drenantes e camadas finas; zonas sujeitas a temperaturas extremas.
Galp RIGI mod	Misturas de alto módulo.
Galp ELASTO mod	Sistema anti-fissuração.
Galp 80/130 mod	Membranas absorventes de tensões e anti-fissuras.

Existem outros betumes modificados dirigidos para fins específicos. Contacte a Assistência Técnica de Betumes.



Execução de pavimento drenante



Aplicação em obra

		35/50 mod	50/70 mod
Temperaturas de utilização indicativas, °C <small>(dependem da viscosidade de cada produto)</small>	mistura	165-175	160-170
	compactação	155-165	150-160

Características do produto

Produto com um ponto de amolecimento mais alto que o do betume convencional e com recuperação elástica considerável. Menor susceptibilidade a temperaturas extremas.

Figura F.1 - Temperaturas de fabrico e compactação de betumes puros e modificados, recomendadas pelo produtor Galp.

